

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Hrvoje Štrbac

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Štrbac

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se na podacima ustupljenim od strane SDEWES Centre, koji su prikupljeni u sklopu projekta AgroCycle (www.agrocycle.eu) financiranog iz programa Obzor 2020 pod ugovorom br. 690142.

Zahvaljujem se svom mentoru, profesoru Nevenu Duiću i asistentu Borisu Ćosiću na ukazanoj pomoći prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se svojoj majci Dragici, ostatku obitelji, djevojci Barbari i svim prijateljima sa kojima sam proveo svoje studentske dane.

Hrvoje Štrbac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Hrvoje Štrbac** Mat. br.: 0035188933

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena koncepta biorafinerije za povećanje učinkovitosti i isplativosti rada pilane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The application of the biorefinery concept to increase the efficiency and economic viability of a sawmill**

Opis zadatka:

Pilanska prerada drveta predstavlja energetski vrlo intenzivnu industriju pa njihova nadogradnja u biorafinerije povećava fleksibilnost rada pilane na slobodnom tržištu te omogućava veću iskoristivost sirovine i ostataka koji nastaju prilikom pilanske prerade drveta. Kako bi se detaljno iskoristila prednost primjene koncepta biorafinerije u pilanskoj industriji na iskoristivost sirovine i isplativost rada tvornice, u radu je potrebno:

1. Napraviti pregled literature o tehnologiji za preradu drveta i drvnih ostataka te o energetskim potrebama u pilanskoj industriji.
2. Napraviti opsežan pregled literature o primjeni koncepta biorafinerije u pilanskoj industriji te opisati način rada ovih postrojenja na slobodnom tržištu prilikom promjene cijene ulazne sirovine i pilanskih proizvoda.
3. Napraviti matematički model biorafinerije temeljen na kogeneracijskom postrojenju izgrađenom u sklopu pilane s energetskim bilancama.
4. Izračunati neto sadašnju vrijednost projekta, uz zadanu cijenu investicije, troška ulazne sirovine, tržišnu cijenu pilanskih proizvoda i električne energije.
5. Napraviti analizu utjecaja promjene vrijednosti nabavne cijene ulazne sirovine, troška električne i toplinske energije, investicijskih troškova u kogeneracijsko postrojenje te cijene gotovih proizvoda i pilanskih ostataka na neto sadašnju vrijednost projekta temeljenom na konceptu biorafinerije.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

15. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Datum predaje rada:

17. siječnja 2019.

Predviđeni datum obrane:

23., 24. i 25. siječnja 2019.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Podjela biomase	5
1.2. Načini za dobivanje energije iz biomase.....	7
2. OSNOVNE TEHNOLOGIJE U PRERADI DRVETA.....	10
2.1. Proces rada u pilani	10
3. KONCEPT BIORAFINERIJE	16
3.1. Klasifikacija biorafinerija	17
4. KOGENERACIJA.....	20
4.1. Tehnologije korištenja biomase	20
4.1.1. Izgaranje.....	21
4.1.2. Rasplinjavanje.....	22
4.2. Tehnološki procesi	24
4.2.1. Postrojenje sa parnom turbinom	25
4.2.2. Postrojenje sa organskim Rankineovim ciklusom (ORC)	26
4.2.3. Postrojenje sa plinskim motorom.....	28
5. MASENI I ENERGETSKI TOKOVI.....	30
5.1. Maseni tokovi.....	30
5.2. Energetski tokovi	30
6. STUDIJA SLUČAJA - IMPLEMENTACIJA KONCEPTA BIORAFINERIJE U PILANSKO POSTROJENJE	32

6.1. Referentni scenarij	35
6.1.1. Proračun referentnog scenarija.....	35
6.2. Scenarij 1 - Piljevina i usitnjeni drvni okrajci nastali u pilanskoj obradi se koriste za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane.....	40
6.2.1. Proračun scenarija 1	40
6.2.2. Analiza osjetljivosti scenarija 1	47
6.3. Scenarij 2 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi koristi se za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane a dio se koristi u postrojenju za proizvodnju peleta	48
6.3.1. Proračun scenarija 2	48
6.3.2. Analiza osjetljivosti scenarija 2	56
6.4. Scenarij 3 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi se koriste kao sirovina u kogeneracijskom postrojenju sa ORC tehnologijom, a ostatak služi kao sirovina za proizvodnju peleta.....	57
6.4.1. Proračun scenarija 3	57
6.4.2. Analiza osjetljivosti scenarija 3	64
7. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Neutralni utjecaj biomase na okoliš [6]	5
Slika 2. Drvna sječka (iverje) [11]	6
Slika 3. Sječa nasada vrbe [13]	7
Slika 4. Načini dobivanja energije iz biomase [14]	8
Slika 5. Prikaz proizvodnog procesa u pilani [16]	11
Slika 6. Stovarište trupaca [16]	12
Slika 7. Skidanje (guljenje) kore u pilani [17]	12
Slika 8. Skinuta (oguljena) kora [17]	13
Slika 9. Transporter trupaca [17].....	13
Slika 10. Tračna pila (brenta). [17]	14
Slika 11. Stroj za usitnjavanje [17]	15
Slika 12. Spremište piljevine [17]	15
Slika 13. Mreža na kojoj se temelji metoda klasifikacije biorafinerijskih sustava [29].....	19
Slika 14. Usporedba energetske iskoristivosti odvojene proizvodnje energije i kogeneracije [19]	20
Slika 15. Nagnuta, vodom hlađena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase [20].....	21
Slika 16. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehurićasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [21].....	22
Slika 17. Faze rasplinjavanja [23]	23
Slika 18. Tržišni status različitih tehnologija kao i raspon primjena s obzirom na veličinu kogeneracijskog postrojenja [12]	25
Slika 19. Shema ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu [12].....	27
Slika 20. Shema kogeneracijskog postrojenja s rasplinjačem biomase i plinskim motorom [12]	28
Slika 21. Kotao u kotlovnici pilane [17]	31
Slika 22. Analiza osjetljivosti scenarija 1	47
Slika 23. Analiza osjetljivosti scenarija 2	56
Slika 24. Analiza osjetljivosti scenarija 3	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine fiksnih tarifnih stavki izražene u kn/kWh [5]	4
Tablica 2. Pregled količina proizvoda pri preradi 100 kg sirovog drveta jelovine	30
Tablica 3. Potrošnja toplinske i električne energije u pilani	31
Tablica 4. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane referentnog scenarija	36
Tablica 5. Godišnja potrošnja energije u pilani referentnog scenarija	37
Tablica 6. Cijene električne energije i piljevine potrebne za proračun	37
Tablica 7. Prihodi i rashodi pilane	38
Tablica 8. Novčani tok referentnog scenarija	39
Tablica 9. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 1	40
Tablica 10. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 1 na godišnjoj razini ...	43
Tablica 11. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 1	44
Tablica 12. Novčani tok scenarija 1	45
Tablica 13. Rezultati proračuna scenarija 1	46
Tablica 14. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 2	49
Tablica 15. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 2 na godišnjoj razini ...	51
Tablica 16. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 2	53
Tablica 17. Novčani tok scenarija 2	54
Tablica 18. Rezultati proračuna scenarija 2	55
Tablica 19. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 3	57
Tablica 20. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 3 na godišnjoj razini ...	60
Tablica 21. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 3	61
Tablica 22. Novčani tok scenarija 3	62
Tablica 23. Rezultati proračuna scenarija 3	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
M	tona	Masa drvnih trupaca
DOiP	tona	Masa drvnih okrajaka i piljevine nastalih tijekom pilanske obrade
K	tona	Masa kore
DG	tona	Masa drveta od kojeg se proizvodi drvena građa
m _{dg}	-	Postotak drveta od kojeg nastaje drvena građa na masu drvnih trupaca
m _{doip}	-	Postotak drvnih okrajaka i piljevine na masu drvnih trupaca
m _k	-	Postotak kore na masu drvnih trupaca
E _g	kWh	Količina električne energije potrebne za pogon pilane u jednoj godini
Q _g	kWh	Količina toplinske energije potrebne za sušenje drvne građe i grijanje postrojenja u jednoj godini
H _d	kWh/kg	Donja ogrjevnost vrijednost piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka
η_t	-	Toplinska učinkovitost kogeneracijske jedinice
η_e	-	Električna učinkovitost kogeneracijske jedinice
η_{uk}	-	Ukupna učinkovitost kogeneracijske jedinice
m _s	kg/h	Maseni protok sirovine
P _s	kmol/h	Prinos suhog sintetskog plina
E _s	kWh	Energija sintetskog plina
p _s	kmol/kg	Prinos suhog sintetskog plina na masu piljevine i drvnih okrajaka
$\Delta H_{md,ssp}$	MJ/kmol	Donja ogrjevnost vrijednost suhog sintetskog plina
P _{el,kp}	kWh	Proizvodnja električne energije u kogeneracijskom postrojenju
Q _{kp}	kWh	Proizvodnja toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju
Q _{sp}	kWh	Toplina koja se u toplovodni sustav vrati hlađenjem sintetskog plina,
Q _r	kWh	Toplina koja se u sustav vrati hlađenjem reaktora
q _{ss}	kWh/t	Toplinska energija potrebna za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih na masu piljevine i drvnih okrajaka
P _{el,vn}	kWh	Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži
η_{tr}	-	Učinkovitost transformatora
Q _{uk}	kWh	Ukupna proizvedena toplinska energija u postrojenju

SAŽETAK

Pilanska prerada drveta predstavlja energetska vrlo intenzivnu industriju pa njena nadogradnja u biorafineriju povećava fleksibilnost rada pilane na slobodnom tržištu te omogućava veću iskoristivost sirovine i ostataka koji nastaju prilikom pilanske prerade drveta. U radu su opisane osnovne tehnologije u preradi drveta, definiran je pojam koncepta biorafinerije i napravljena je klasifikacija biorafinerija prema IEA Bioenergy Task 42, te su opisane tehnologije i tehnološki procesi kojima se može dobiti električna i toplinska energija iz drvne biomase u kogeneracijskim postrojenjima. Nakon toga se u prvom scenariju konfiguriralo kogeneracijsko postrojenje sa reaktorima za rasplinjavanje biomase, te se uz to postrojenje dodalo i postrojenje za proizvodnju peleta u drugom scenariju, dok se u trećem scenariju konfiguriralo kogeneracijsko postrojenje sa ORC tehnologijom, te se uz to postrojenje dodalo i postrojenje za proizvodnju peleta. Ulazna sirovina u pilanu kao biorafineriju su trupci jelovine, a proizvodi su drvna građa, električna i toplinska energija, te ostali nusproizvodi koji se pojavljuju tokom proizvodnog procesa, a imaju određenu tržišnu vrijednost. Napravljena je i studija slučaja gdje je analizirana isplativost ulaganja u ove vrste tehnologije uzimajući u obzir tržišne cijene.

Ključne riječi: Koncept biorafinerije, Pilanska industrija, Kogeneracija

SUMMARY

Sawmill wood processing is an energy intensive industry so its upgrading into a biorefinery increases the flexibility of sawmill production on the free market and enables greater utilization of raw materials and residues resulting from sawmill processing. In this paper the basic technologies in wood processing have been described, the concept of a biorefinery has been defined, the biorefineries classification according to IEA Bioenergy Task 42 has been described and the technologies and technological processes for generating electric and thermal energy from wood biomass in cogeneration plants have been described. In the first scenario, a cogeneration plant with biomass gasification reactors has been configured and a pellet production plant was added to the plant in the second scenario, while in the third scenario a cogeneration plant with ORC technology has been configured and a pellet production plant was added to the plant. Input raw material in a sawmill as a biorefinery is logs of fir, and the products are lumber, electrical and thermal energy, and other by-products that are produced during the production process and have a certain market value. A case study has also been conducted where the cost-effectiveness of investment in this type of technology was analysed taking into account market prices.

Key words: Bio-refinery concept, Sawmill industry, Cogeneration

1. UVOD

Biomasa je organski materijal koji potječe od biljaka i životinja i predstavlja obnovljivi izvor energije. Godišnje nastaje oko 2000 milijarde tona suhe biomase na zemlji te stoga iskorištavanje biomase ima veliki potencijal u budućnosti [1]. Biomasa sadrži manje štetnih tvari kao što su npr. sumpor i teške kovine od fosilnih goriva, te je zbog toga prihvatljivije gorivo u smislu očuvanja okoliša. K tome, korištenje energije biomase pruža znatne mogućnosti za otvaranje novih radnih mjesta, te tako može imati znatan pozitivan utjecaj na lokalno i nacionalno gospodarstvo, a također može doprinijeti i bržem ispunjenju energetske ciljeve Europske Unije do 2030. koji uključuju [2,3]:

- smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 40% u odnosu na emisiju iz 1990. godine,
- postizanje udjela potrošnje energije u Europskoj uniji iz obnovljivih izvora od najmanje 27%,
- povećanje energetske učinkovitosti za najmanje 30%,
- elektroenergetsku povezanost od 15%.

Biomasa, kao dio obnovljivih izvora energije je dobila još veću ulogu u energetske strategiji Europske Unije Pariškim sporazumom o klimatskim promjenama koji je postignut 12. prosinca 2015. godine, a stupio je na snagu 4. listopada 2016. godine nakon ratifikacije Europske unije. Glavne mjere Pariškog sporazuma koje bi trebale smanjiti opasnost od klimatskih promjena su:

- zadržati povećanje globalne prosječne temperature na razini koja je znatno niža od 2 °C iznad razina u predindustrijskom razdoblju te poduzeti mjere u svrhu ograničavanja rasta globalne prosječne temperature iznad 1,5 °C iznad razina u predindustrijskom razdoblju;
- povećati sposobnost prilagodbe posljedicama klimatskih promjena i poticati smanjenje emisija stakleničkih plinova na način kojim se ne ugrožava proizvodnja hrane;
- osigurati financiranje projekata koji smanjuju emisiju stakleničkih plinova i povećavaju otpornost na klimatske promjene.

Također, strateške odrednice hrvatske energetske politike usmjerene su k povećanju udjela obnovljivih izvora energije u neposrednoj potrošnji, pri čemu se najveće povećanje očekuje u korištenju biomase u energetske svrhe [4].

Ovakva očekivanja su potvrđena i Akcijskom planu za obnovljive izvore energije iz 2013. godine u kojem je kao cilj navedeno do kraja 2020. godine 35% proizvodnje električne energije iz OIE, uključujući velike hidroelektrane, u ukupnoj potrošnji električne energije. Što se tiče biomase cilj u planu je navedena upotreba 26 PJ iz biomase do 2020 [4].

U Nacionalnom Akcijskom planu za obnovljive izvore energije je također opisan i program financijske potpore pod nazivom "Poticanje primjene obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije". U njemu su protumačeni pravni okviri koji su bili važeći u vrijeme njegove objave. Među tim pravnim okvirima je i "Uredba o minimalnom udjelu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije čija se proizvodnja potiče". U njoj su određeni nacionalni ciljevi vezani za postrojenja koja proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora energije te je propisan minimalni udio električne energije čija se proizvodnja potiče u ukupnoj neposrednoj potrošnji električne energije. Ova uredba prestala je važiti 2014. godine. Također, među pravnim okvirima je i "Uredba o naknadama za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije". U njoj se propisuje da svi kupci električne energije plaćaju naknadu za poticanje, a sredstva te naknade koriste se za isplatu poticajne cijene povlaštenim proizvođačima za isporučenu električnu energiju, za financiranje poslova HROTE-a te za uravnoteženje elektroenergetskog sustava. Ova uredba prestala je važiti 2017. godine. HROTE i povlašteni proizvođači sklapali su ugovore o otkupu električne energije kojima je zagarantirano da HROTE otkupljuje svu električnu energiju čija se proizvodnja potiče te isplaćuje proizvođače prema "Tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije" [4].

Na temelju zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, Vlada Republike Hrvatske je 20. prosinca 2018. donijela uredbu o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija. U uredbi su definirani pojmovi kao što su maksimalna zajamčena otkupna cijena i maksimalna referentna vrijednost električne energije.

Maksimalna zajamčena otkupna cijena i maksimalna referentna vrijednost električne energije su iznosi u kn/MWh koji su jednaki troškovima proizvodnje električne energije po MWh njene proizvodnje referentnog postrojenja iz određene grupe postrojenja čija se izgradnja potiče ugovorom o otkupu električne energije zajamčenom otkupnom cijenom, odnosno ugovorom o tržišnoj premiji [38].

Osnovna razlika između ova dva sustava poticanja je to da su povlašteni proizvođači u sustavu poticanja tržišnim premijama ovisni o kretanju cijene električne energije na tržištu, jer oni dio prihoda dobivaju prodajom proizvedene električne energije direktno na tržište po trenutnoj cijeni električne energije, te osim toga dobivaju tržišnu premiju. S druge, strane povlaštenim proizvođačima u sustavu zajamčenih otkupnih cijena je cijena proizvedene električne energije prethodno određena i nepromjenjiva je te ne ovisi o kretanju na tržištu [37].

Najmanje jednom godišnje se provode javni natječaji za dodjelu tržišne premije i za poticanje zajamčenom otkupnom cijenom od strane operatora tržišta električne energije. Dva do četiri mjeseca prije objave natječaja operator je dužan objaviti javni poziv za prikupljanje svih ponuda nositelja projekata koji bi htjeli sudjelovati na natječaju.

Te ponude, između ostaloga, moraju sadržavati podatke kao što su priključna snaga postrojenja za koje nositelj projekta sudjeluje na natječaju za poticanje zajamčenom otkupnom cijenom ili na natječaju za dodjelu tržišne premije i iznos referentne vrijednosti kojom nositelj projekta sudjeluje na natječaju za dodjelu tržišne premije ili iznos otkupne cijene s kojom nositelj projekta sudjeluje na natječaju za poticanje zajamčenom otkupnom cijenom.

Ako je zbroj snaga postrojenja koja sudjeluju u natječaju veći od prethodno određene kvote za određenu grupu postrojenja dobitnici se određuju tako da se ponude redaju prema iznosu ponuđene otkupne cijene iz ponude (u slučaju natječaja za poticanje zajamčenom otkupnom cijenom) ili prema iznosu referentne vrijednosti iz ponude (u slučaju natječaja za dodjelu tržišne premije), od najmanje prema najvećoj. Ako postoje ponude sa istom ponuđenom otkupnom cijenom ili referentnom vrijednosti, redaju se prema priključnoj snazi iz ponude, opet od najmanje prema najvećoj.

Visina referentne vrijednosti električne energije koja je postignuta ugovorom o tržišnoj premiji, odnosno visina otkupne cijene koja je postignuta ugovorom o otkupu električne energije zajamčene otkupne cijene korigiraju se svake godine u odnosu na njihove korigirane vrijednosti iz prethodne godine.

Operator tržišta električne energije svake godine određuje i javno objavljuje maksimalne zajamčene otkupne cijene i maksimalne referentne vrijednosti električne energije za sve vrste i veličine postrojenja koja mogu sudjelovati u ovim natjecajima.

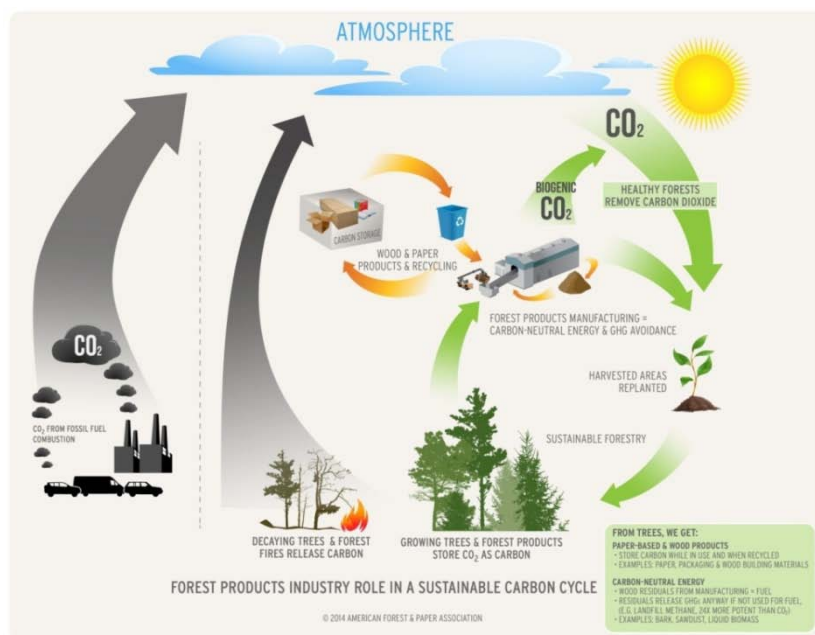
Kako bi se izračunala tržišna premija, moraju se izračunati prvo referentne tržišne cijene koje ovise o vrsti postrojenja za proizvodnju električne energije. Za te proračune je zadužen operator tržišta električne energije koji jednom mjesečno određuje referentne tržišne cijene električne energije za prethodni mjesec [38].

Za proračun u diplomskom radu će se koristiti podaci uzeti iz tarifnog sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije uzeti sa stranica Hrvatskog operatera tržišta energije. Razine fiksnih tarifnih stavki izražene u kn/kWh prikazane su u tablici 1. [5]:

Tablica 1. Razine fiksnih tarifnih stavki izražene u kn/kWh [5]

Tip postrojenja	kn/kWh
elektrane na biomasu, uključujući biorazgradive dijelove industrijskog i komunalnog otpada instalirane snage do uključivo 300 kW	1,3
elektrane na biomasu, uključujući biorazgradive dijelove industrijskog i komunalnog otpada veće od 300 kW do uključivo 2 MW	1,25
elektrane na biomasu, uključujući biorazgradive dijelove industrijskog i komunalnog otpada veće od 2 MW	1,2

Glavna prednost biomase u odnosu na fosilna goriva je njena obnovljivost. Računa se da je opterećenje atmosfere s CO₂ pri korištenju biomase kao goriva zanemarivo, budući da je količina emitiranog CO₂ prilikom izgaranja otprilike jednaka količini apsorbiranog CO₂ tijekom rasta biljke. Na slici 1. je prikazan neutralni utjecaj biomase na okoliš.



Slika 1. Neutralni utjecaj biomase na okoliš [6]

1.1. Podjela biomase

Biomasa je gorivo koje dobivamo od biološkog materijala kao što su drvo, biljke, životinjski, industrijski i gradski otpad koji je biorazgradiv [7 – 9].

Kruta biomasa se dijeli u sljedeće glavne kategorije [10]:

1. Drvna biomasa

- 1.1. Biomasa od šumskog drveta i energetske plantaže
- 1.2. Drvna industrija, sekundarni proizvodi i ostaci u drvnoj industriji
- 1.3. Biomasa od korištenog drveta

2. Biljna biomasa

- 2.1. Biomasa od poljoprivrednog i vrtlarskog bilja
- 2.2. Biljna industrija, sekundarni proizvodi i ostaci

3. Voćna biomasa

- 3.1. Biomasa iz voćnjaka i vrtova
- 3.2. Voćarska industrija, sekundarni proizvodi i ostaci

Drvena biomasa zajedničko je ime za svu šumsku drvenu masu (stablo i krošnja drveta) i drvene ostatke nastale iz prerade drveta [11]. U drvenu biomasu spadaju ostaci koji nastaju sječom šume (drvni isječki, granje, lišće, kora, panjevi) i industrijskom preradom drveta (piljevina, blanjevina, drvena prašina) te oboljela stabla i uništena šumska masa uslijed vremenskih neprilika.

U pojedinim fazama procesa pilanske obrade trupaca nastaju različite količine drvnog ostatka koji se načelno dijeli na krupni ostatak (okorci, očelci, okrajci, porupci) i piljevinu [12]. Količina ovog otpada ovisi o vrsti i kvaliteti ulazne sirovine. Na slici 2. je prikazana drvena sječka (iverje).



Slika 2. Drvena sječka (iverje) [11]

U zadnje vrijeme su postale popularne i brzorastuće vrste drva kao npr. topola i vrba. Nakon sječe se brzorastuće vrste drva obrađuju u drvenu sječku, pelete, brikete i bale te se koriste kao sirovina za proizvodnju električne i/ili toplinske energije. Postoje tri brzorastuće vrste drva [13]:

- godišnje biljne vrste, koje se sade i beru svake godine (kenaf, konoplja, itd.)
- višegodišnje vrste, nakon što se zasade rastu 12 - 25 godina a beru se svake godine (miscanthus, trstike, itd.)
- kulture kratkih ophodnji, sade se svakih 20 do 30 godina a beru svake 2 do 8 godina (topola, vrba, paulovnja, itd.)

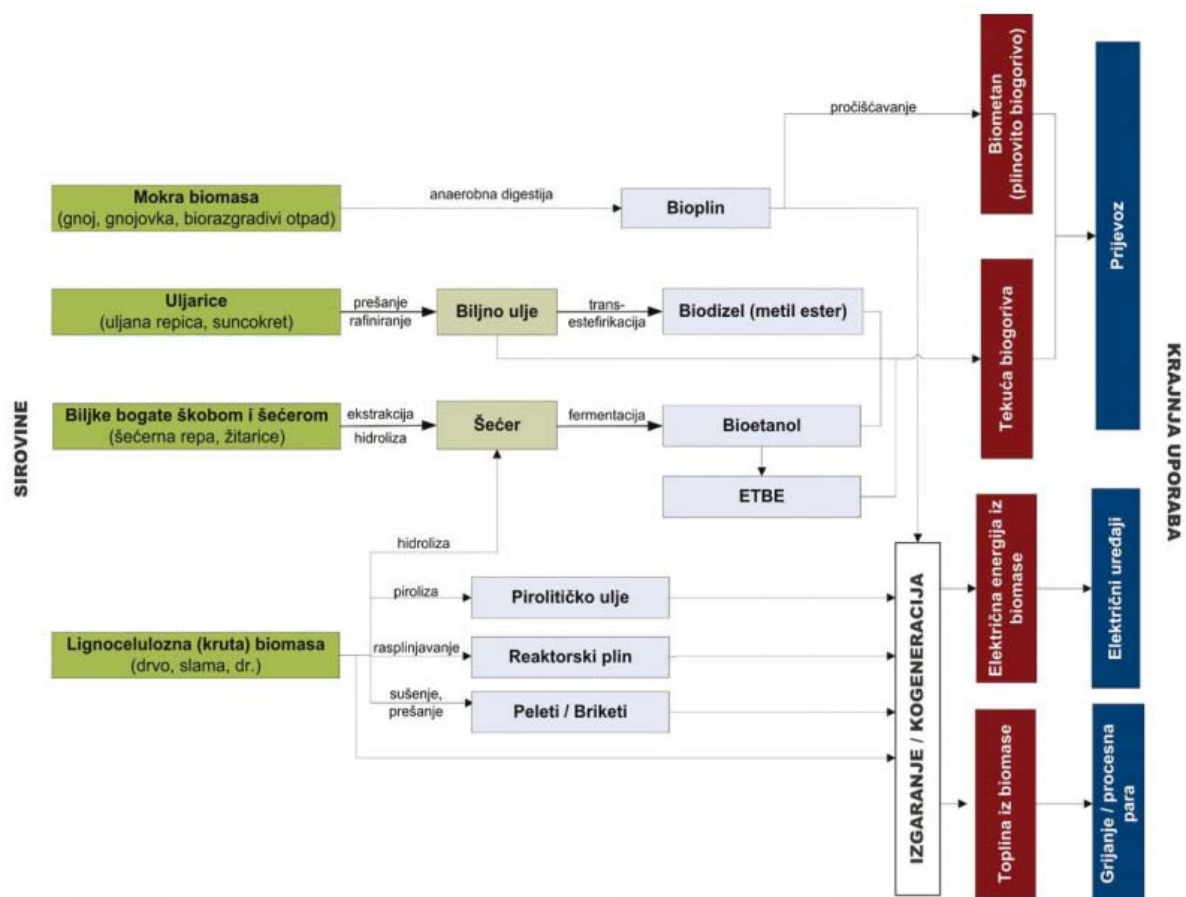
Na slici 3. je prikazana sječa nasada vrbe.



Slika 3. Sječa nasada vrbe [13]

1.2. Načini za dobivanje energije iz biomase

Postoje razni načini dobivanja električne ili toplinske energije iz biomase. Općenito se dijele na direktno izgaranje krute biomase te biokemijske i termokemijske procese kojima se biomasa pretvara u goriva ili proizvode koji se kasnije mogu koristiti za proizvodnju energije. Na slici 4. su prikazani načini dobivanja energije iz biomase.



Slika 4. Načini dobivanja energije iz biomase [14]

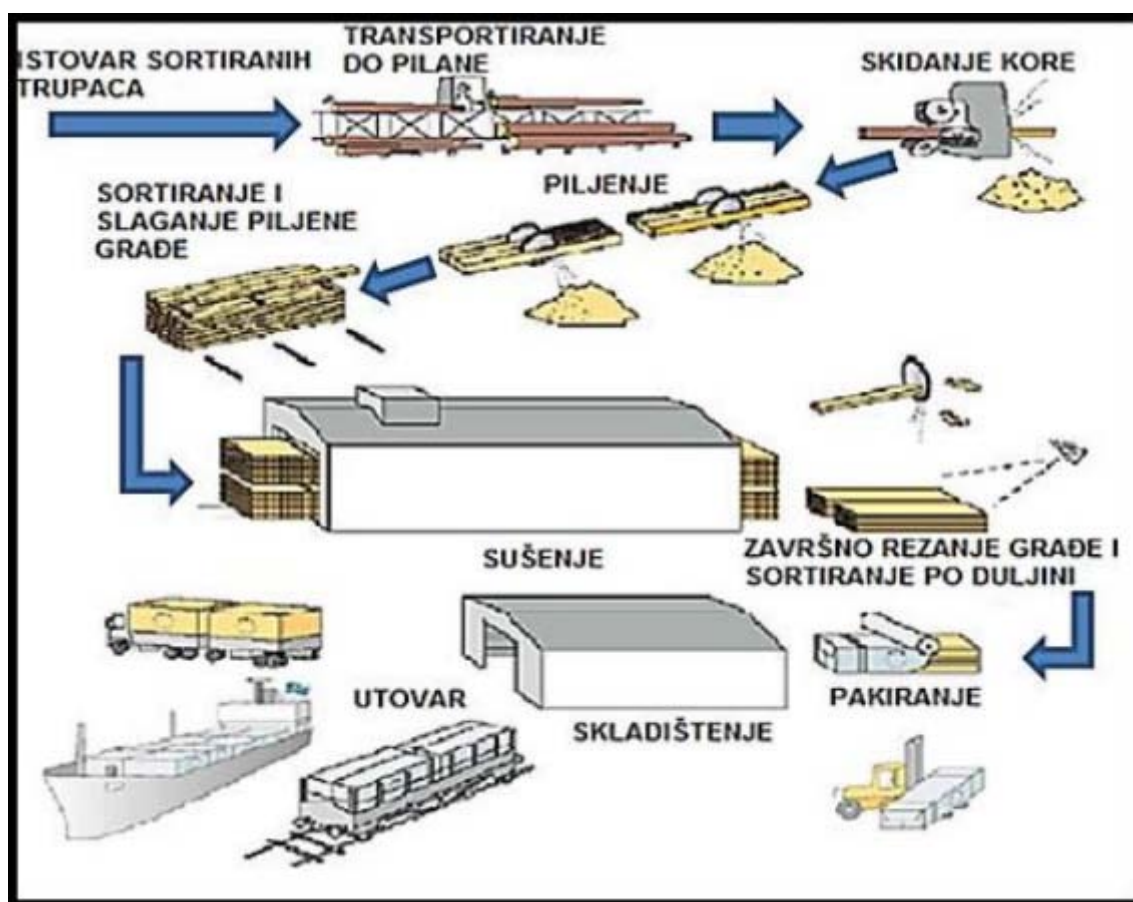
U industrijskim pogonima kao što su pilane potrebne su velike količine toplinske i električne energije kako bi mogle nesmetano funkcionirati. Toplinska energija se često dobiva izgaranjem drvnih ostataka dobivenih tijekom procesa obrade drveta u pilani poput okrajaka, kore i piljevine u kotlovnici pogona, dok se električna energija kupuje iz elektroenergetskog sustava. Ti ostaci se mogu iskoristiti i kao energenti za kogeneracijski proces te se tako može zatvoriti energetska ciklus i smanjiti ovisnost pilane o stanju na tržištu energije. Instaliranjem kogeneracijskog postrojenja pilana može ovisno o uvjetima na tržištu reagirati i usmjeriti svoje sirovinne tokove u proizvodnju proizvoda gdje će ostvariti maksimalno mogući profit. Kako bi mogli integrirati kogeneracijsko postrojenje unutar pilane, potrebno je upoznati se s osnovnim tehnologijama prerade drveta koje se primjenjuju u pilanama, a zatim i s tehnologijama kogeneracijskih postrojenja koja kao sirovinu koriste biomasu. Za kvalitetnu analizu isplativosti ugradnje kogeneracijskog postrojenja u pilanu potrebno je napraviti pregled kretanja cijena drvnih ostataka na tržištu i cijene električne energije kako bi se utvrdio period povrata investicije. U realnom sektoru uvijek postoje nepredviđene situacije, tako da je na kraju rada predstavljena analiza osjetljivosti investicije kako bi se utvrdilo vrijeme povrata u raznim scenarijima.

2. OSNOVNE TEHNOLOGIJE U PRERADI DRVETA

Pilane su postrojenja u kojima se drvni trupci obrađuju i režu, te se dobivaju razne vrste proizvoda. U modernim pilanama se koriste motorizirane pile za rezanje trupaca po dužini, te nakon toga poprečno po dimenzijama ovisnim o standardnim ili prilagođenim veličinama. Prije početka korištenja pilana, drvo se obrađivalo na različite ručne načine, sa ručnim pilama. Prve pilane sa mehanički pokretanim pilama su se pojavile u 11. odnosno 13. stoljeću u zapadnoj i srednjoj Europi. U 16. stoljeću je prvi put konstruirana venecijanska (mletačka) jarmača koja je bila pokretana na vodeni pogon. Pilane na parni pogon su se počele pojavljivati početkom 19. stoljeća u Engleskoj, a u Hrvatskoj su se pojavile sredinom 19. stoljeća. U 20. stoljeću implementiranjem električne energije i napretkom tehnologije procesi u pilanama su se značajno modernizirali. U današnje vrijeme su pilane najčešće postrojenja velikog kapaciteta te je u njima većina procesa kompjuterizirana. Osim piljene građe, koriste se i svi nusproizvodi, uključujući piljevinu, koru, drvnu sječku i drvene pelete, što stvara raznoliku ponudu pilanskih proizvoda [15].

2.1. Proces rada u pilani

Proizvodni procesi u pilanama slični su onima prije stotinu godina. Trupci ulaze na jedan kraj a dimenzionirana drvena građa izlazi na drugom kraju. Na slici 5. je prikazan primjer proizvodnog procesa u jednoj prosječno opremljenoj pilani.



Slika 5. Prikaz proizvodnog procesa u pilani [16]

Trupci se dovoze do pilane na kamionima ili vagonima te se sortiraju kako bi bilo lakše skinuti koru. Na slici 6. je prikazano stovarište trupaca.



Slika 6. Stovarište trupaca [16]

Ovisno o proizvodnom procesu, trupci se dovode na piljenje zajedno s korom koja se skida u doradnoj pilani ili na strojevima za skidanje (guljenje) kore. Na slici 7. je prikazano skidanje (guljenje) kore u pilani, a na slici 8. je prikazana skinuta (oguljena) kora.



Slika 7. Skidanje (guljenje) kore u pilani [17]



Slika 8. Skinuta (oguljena) kora [17]

Nakon skidanja kore trupci se transportiraju transporterom prema pili. Na slici 9. je prikazan transporter trupaca.



Slika 9. Transporter trupaca [17]

Nakon toga slijedi piljenje koje je najvažniji proces u primarnoj obradi drveta. Piljenje je postupak obrade odvajanjem čestice koji se upotrebljava kod odsijecanja ili dijeljenja materijala. Prema načinu gibanja alata, piljenje se dijeli na pravocrtno i kružno piljenje. Sam alat se razlikuje po obliku, te imamo kružne, tračne i lisne pile.

Tračne ili vrpčaste pile (brente) koriste tanke, fleksibilne, kontinuirane čelične trake s reznim zubima na jednom rubu. Oštrica radi na dva kolotura (kotača), a prolazi kroz otvor na radnom stolu gdje se prinosi drvo. U pilanama se trupac automatski (strojno) prinosi do oštrice pile po unaprijed određenoj liniji po radnom stolu. Nakon piljenja na brenti se dalje oblikuje drvena građa ovisno o pilani. Na slici 10. je prikazana tračna pila (brenta).



Slika 10. Tračna pila (brenta). [17]

Pilanski ostatak nastaje kao nusproizvod raznih procesa u pilani. Može biti krupni ostatak (kora, okrajci itd.) i sitni ostatak (piljevina, drvena prašina itd.). Pilanski ostatak se primjenjuje na razne načine, od proizvodnje električne i toplinske energije ili kao sirovina u papirnoj industriji, prilikom proizvodnje peleta i briketa, itd.

Krupni pilanski ostaci otpremaju se do stroja za usitnjavanje te se nakon toga u obliku piljevine transportiraju na spremište piljevine. Na spremište piljevine se transportira i sitni pilanski ostatak koji je nastao pri različitim fazama obrade. Na slici 11. je prikazan stroj za usitnjavanje, a na slici 12. je prikazano spremište piljevine.



Slika 11. Stroj za usitnjavanje [17]



Slika 12. Spremište piljevine [17]

3. KONCEPT BIORAFINERIJE

Postoji nekoliko načina definiranja pojma "biorafinerija". Najjednostavnije rečeno, ono što je za naftu naftna rafinerija, to je za biomasu biorafinerija. Prema [29] biorafinerija je održiva obrada biomase u spektar utrživih proizvoda i energije. Svrha biorafinerije je nadograditi i obraditi biomasu u vrijedne proizvode koristeći različite procese pretvorbe.

Može se reći i da proces u biorafineriji razdvaja biomasu u manje kemijske građevne blokove. Oni se mogu smatrati krajnjim proizvodom specifičnog procesa, koji se koriste ili se dalje pretvaraju u druge krajnje proizvode s dodanom vrijednošću kao što su kemikalije, biogoriva, proizvodi od papira itd. Također, iako se najvjerojatnije značajna proizvodnja energije u obliku topline ili električne energije odvija u biorafineriji, to ne mora biti osnovna svrha biorafinerije. Prema toj definiciji tvornica za pelete ili pilana nisu same po sebi biorafinerije, ali se mogu potencijalno proširiti u takva postrojenja [30].

Sličnost biorafinerije i rafinerije nafte nije samo u osnovnom konceptu, nego i u metodama koje se koriste, npr. prilikom prerade biomase u proizvod dodatne vrijednosti mogu se koristiti slične metode kao u klasičnim naftnim rafinerijama (destilacija, obrada materijala, sortiranje proizvoda) [31]. Proizvodi iz biorafinerija koriste se za iste namjene kao i proizvodi iz klasičnih naftnih rafinerija (bioplin umjesto prirodnog plina, etanol umjesto dizela), tako da oni međusobno konkuriraju na tržištu [32]. Razlika između biorafinerija i klasičnih naftnih rafinerija leži u tome da biorafinerije imaju veći izbor sirovina za proizvodnju (gotovo sva organska tvar iz raznih industrija i društva poput nusproizvoda poljoprivredne proizvodnje, komunalnog otpada i otpada iz klaonice), dok klasične naftne rafinerije za svoju proizvodnju koriste fosilna goriva. Upravo ta razlika daje prednost biorafinerijama u smislu održivosti procesa i očuvanja okoliša [33].

Ulaganje u nadogradnju postojeće tvornice u biorafineriju može biti visoko rizično zbog promjena cijena na tržištu te je potrebno napraviti kvalitetnu i detaljnu analizu prije investiranja u postrojenje kako bi se njegova investicija isplatila u za to prihvatljivom razdoblju. Neki koncepti daju mogućnost brzog povrata investicije, te su oni dakako poželjniji investitorima.

Bitni parametri prilikom izrade analize isplativosti ulaganja u proširenje tvornice na način da ona postaje biorafinerija su sigurnost dugoročne opskrbe sirovinom i dobra procjena kretanja tržišnih cijena proizvoda u budućnosti [34]. Najviše su isplativa postrojenja u koja se ulaže, a nalaze se u sklopu neke tvornice, jer tamo postoji potreba za energijama i raznim sirovinama, a izbjegnut je trošak transporta. Primjer bi bio kada se biorafinerija izgradi u sklopu tvornice koja generira otpad koji se može koristiti u biorafineriji, ali u svojem radu zahtjeva toplinu ili bioplin. Tada biorafinerija i tvornica međusobno izmjenjuju proizvode.

Biorafinerija može koristiti razne vrste biomase od drvene biomase, biomase iz poljoprivrede, akvakulture i ostatke iz industrije i kućanstava. Biorafinerija nije posve novi koncept. Mnoge tradicionalne tehnologije pretvorbe biomase kao što su šećerna i papirna industrija se mogu (djelomično) smatrati biorafinerijama.

Međutim, nekoliko gospodarskih i ekoloških faktora poput globalnog zatopljenja, očuvanja energije i sigurnosti opskrbe su također usmjeravali takve industrije da dodatno poboljšaju svoje djelovanje u smislu unapređenja u biorafinerije.

3.1. Klasifikacija biorafinerija

IEA Bioenergy Task 42 je 2008 razvio je sustav klasifikacije biorafinerije. Ovaj se sustav temelji na shematskom prikazu lanaca od početnog stanja biomase do krajnjih proizvoda. Pristup klasifikaciji sastoji se od četiri glavna svojstva koja mogu identificirati, klasificirati i opisati različite sustave biorafinerija:

- platforme,
- proizvodi (energija, materijali na bazi biomase i kemikalije),
- sirovine
- i procesi pretvorbe

Platforme (npr. C5 / C6 šećeri, sintetski plin, bioplin) su međuprodukti koji mogu povezati različite sustave biorafinerije i njihove procese. Platforme također mogu biti i konačni proizvod. Broj uključenih platformi pokazuju složenost sustava.

Dvije grupe proizvoda biorafinerija su:

- energija (npr. bioetanol, biodizel, sintetička biogoriva)
- i proizvodi (npr. kemikalije, materijali i hrana).

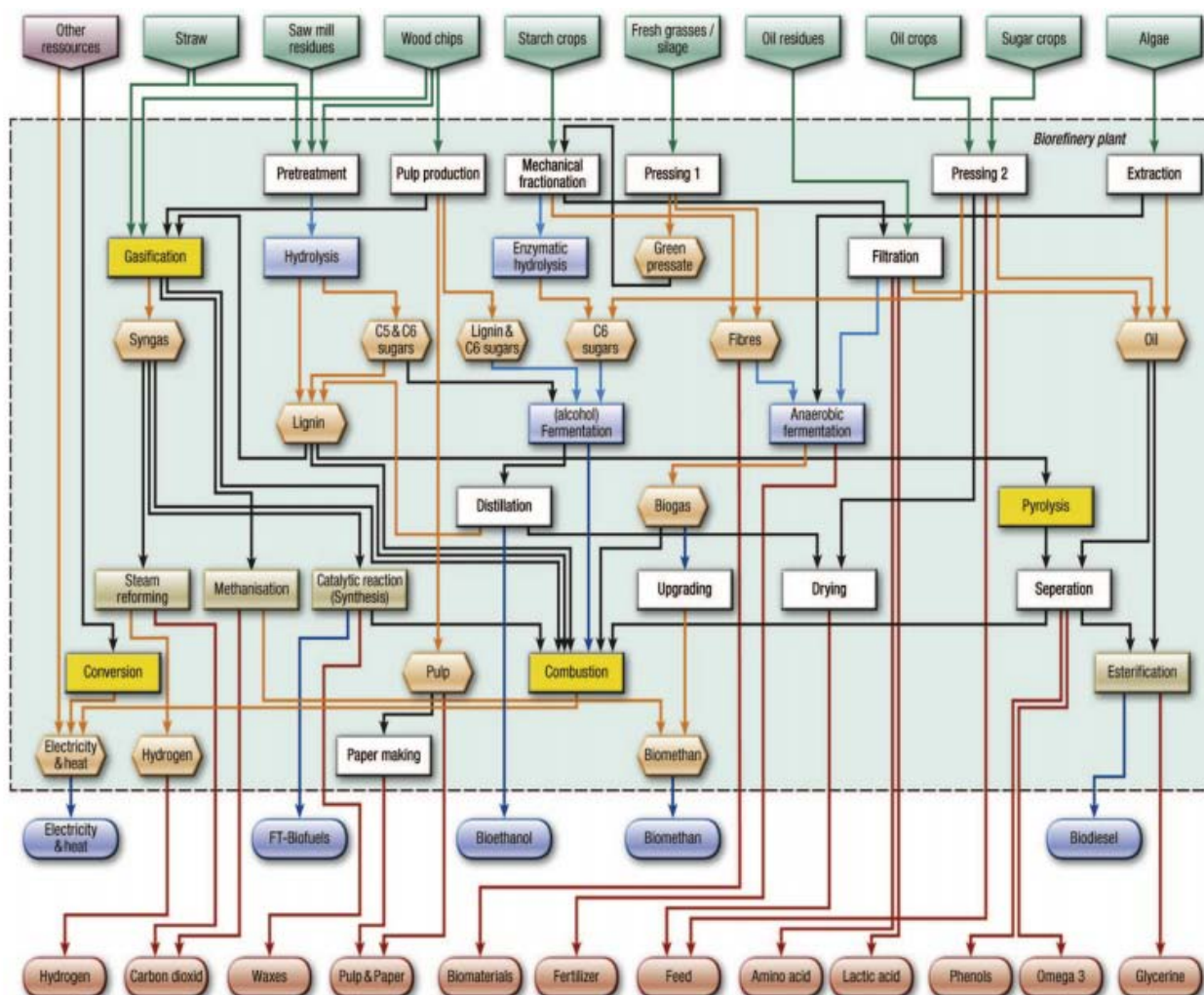
Dvije glavne skupine sirovina su:

- energetski usjevi iz poljoprivrede (npr. škrobni usjevi, brzorastuće vrste drva)
- i ostaci biomase iz poljoprivrede, šumarstva, trgovine i industrije (npr. slama, kora, drvena sječka iz šumskih ostataka, razne vrste otpada iz obrade biomase).

U sustavu klasifikacije je napravljena diferencijacija između četiri glavna procesa pretvorbe, a to su:

- biokemijska pretvorba (npr. fermentacija, enzimatska pretvorba)
- termokemijska pretvorba (npr. rasplinjavanje)
- kemijska pretvorba (npr. kiselinska hidroliza, sinteza, esterifikacija)
- i mehanički procesi (npr. frakcioniranje, prešanje, smanjenje veličine)

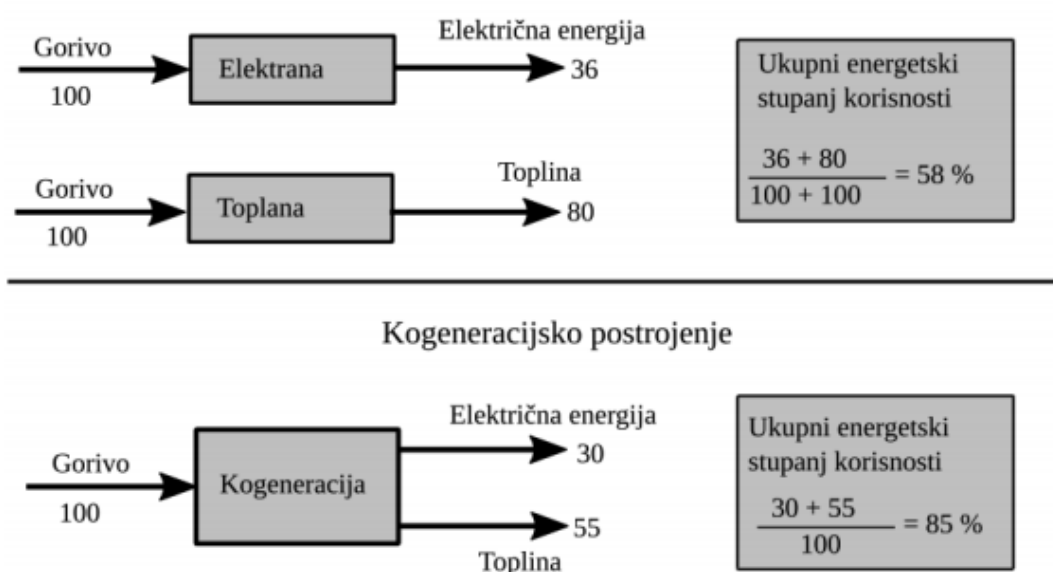
Na slici 13. je prikazana mreža na kojoj se temelji metoda klasifikacije biorafinerijskih sustava [29].



Slika 13. Mreža na kojoj se temelji metoda klasifikacije biorafinerijskih sustava [29]

4. KOGENERACIJA

Kogeneracija (CHP) je istovremena proizvodnja električne energije s iskorištavanjem toplinske energije. Kogeneracija je vrlo učinkovit oblik pretvorbe energije i može ostvariti uštede primarne energije od oko 40% u usporedbi s odvojenom proizvodnjom električne energije i toplinske energije. Kogeneracijska postrojenja obično su smještena blizu krajnjeg korisnika i stoga pomažu u smanjenju gubitaka pri transportu i distribuciji. Na slici 14. je prikazana usporedba energetske iskoristivosti odvojene proizvodnje energije i kogeneracije.



Slika 14. Usporedba energetske iskoristivosti odvojene proizvodnje energije i kogeneracije [19]

4.1. Tehnologije korištenja biomase

Dvije tehnologije koje se najviše koriste kako bi se proizvele električna i toplinska energija u kogeneracijskim postrojenjima su izgaranje biomase i rasplinjavanje. Tehnologija izgaranja je zastupljenija dok se tehnologija rasplinjavanja polako uvodi na tržište.

4.1.1. Izgaranje

Tri tehnologije izgaranja koje se najčešće koriste za dobivanje energije iz biomase su:

- izgaranje u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom,
- izgaranje u mjehuričastom fluidiziranom sloju (BFB),
- te izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (CFB).

Općenito govoreći, izgaranje u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom je pogodno za goriva s visokim sadržajem vlage, pepela i za različite veličine čestica goriva, ali s nižom granicom za sitnije čestice. Tehnologija rešetke koristi se za elektrane na biomasu do 50 MWe. Dimenzioniranje ložišta ovisi o vrsti biomase, sadržaju vlage, veličini čestica goriva, točki taljenja pepela itd. Za proces izgaranja, a time i učinkovitost kotla ključno je da je gorivo ili mješavina goriva dobro raspoređena po površini rešetke u ložištu [27]. U svim ložištima s rešetkom se odvija isti proces:

- Sušenje goriva
- Piroliza i izgaranje hlapljivih tvari
- Izgaranje pougljenih čestica.

Na slici 15. je prikazana nagnuta, vodom hlađena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase.

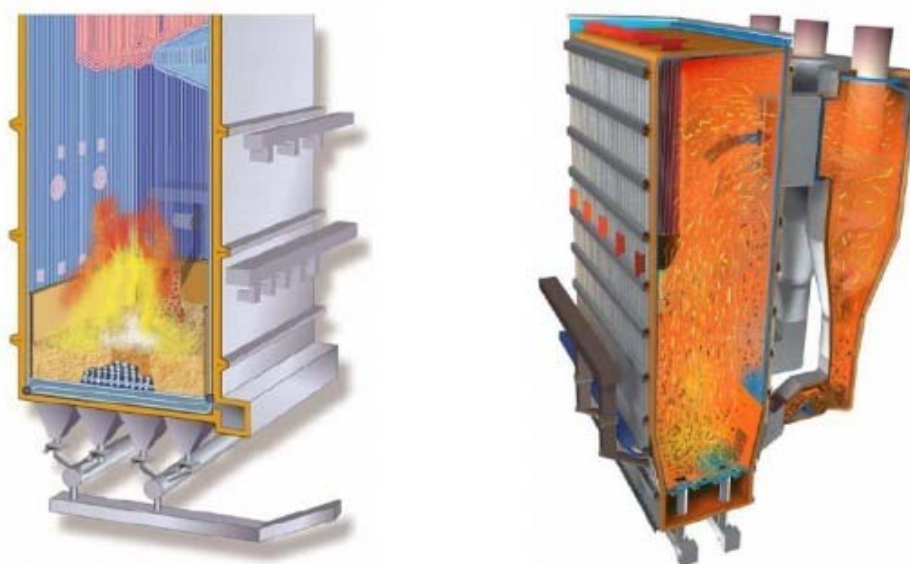


Slika 15. Nagnuta, vodom hlađena, vibrirajuća rešetka za izgaranje biomase [20]

Često gorivo za tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju je biomasa. Dostupne su dvije tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju:

- fluidizirani sloj s mjehurićima (BFB)
- i cirkulirajući fluidizirani sloj (CFB).

Obje su dokazane tehnologije. Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju s mjehurićima poželjna je u postrojenjima manjeg kapaciteta, s gorivima koja su niske toplinske vrijednosti i visokim sadržajem vlage. Tehnologija izgaranja u cirkulirajućem fluidiziranom sloju obično se koristi u postrojenjima većeg kapaciteta. Obe tehnologije se mogu koristiti za širok raspon vrsta biomase i posebno su pogodne za goriva s visokim sadržajem vlage, pepela i visokim alkalnim sadržajem, kao što je slama [27]. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju prikazan je na slici 16.



Slika 16. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehurićasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [21]

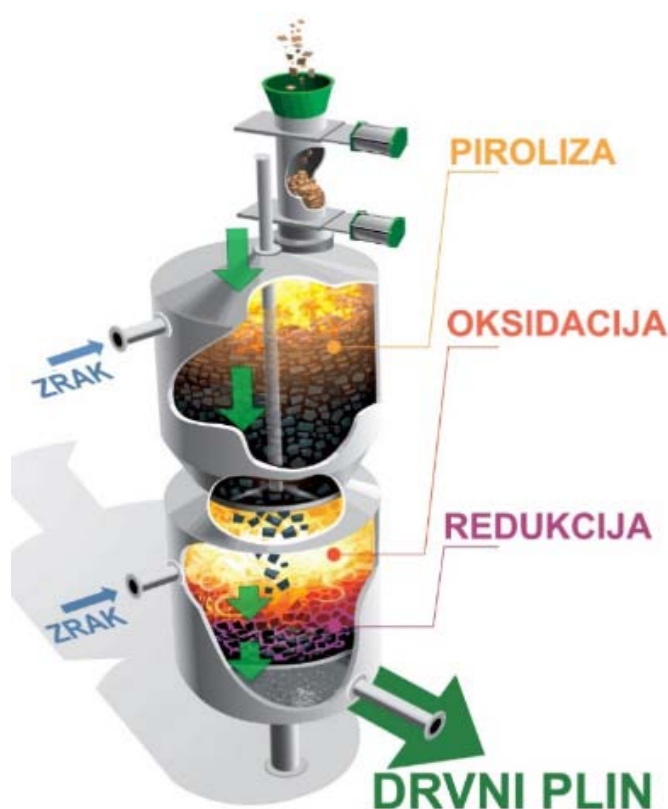
4.1.2. Rasplinjavanje

Rasplinjavanje je tehnološki proces koji može izvršiti pretvorbu bilo koje sirovine na bazi ugljika u sintetski plin. Taj se proces odvija u reaktoru, unutar kojeg se pod određenim nametnutim visoko-temperaturnim uvjetima odvijaju faze rasplinjavanja. Reakcije rasplinjavanja mogu se odvijati indirektnim rasplinjavanjem, gdje se toplina razvija izvan rasplinjača i prenosi na njega, ili direktnim rasplinjavanjem, gdje se toplina stvara

egzotermnim izgaranjem i djelomičnim izgaranjem unutar rasplinjača [22]. Postoje četiri glavne faze rasplinjavanja:

- sušenje goriva, na temperaturi do približno 200 °C
- piroliza (zagrijavanje bez kisika do temperature od približno 500 °C)
- oksidacija (na temperaturama sloja do 900 °C)
- redukcija (pri temperaturi do približno 1200 °C)

Faze rasplinjavanja su ilustrirane na slici 17.



Slika 17. Faze rasplinjavanja [23]

Rasplinjivanje je vrlo svestran proces, jer gotovo svaka suha sirovina može biti pretvorena u plinski plin. Ako se u postrojenje dostavlja mokra biomasa, potrebna je predobrada i sušenje. Potrebna toplinska energija za proces dolazi od djelomičnog izgaranja biomase tako što se dobavlja ograničena količina zraka.

Stvoreni plin, koji se sastoji od gorivih komponenata (ugljični monoksid, vodik, metan, te male količine etana i propana), te od određenih količina ugljičnog dioksida i vodene pare, se u načelu može koristiti za proizvodnju električne energije izravno u motorima ili korištenjem

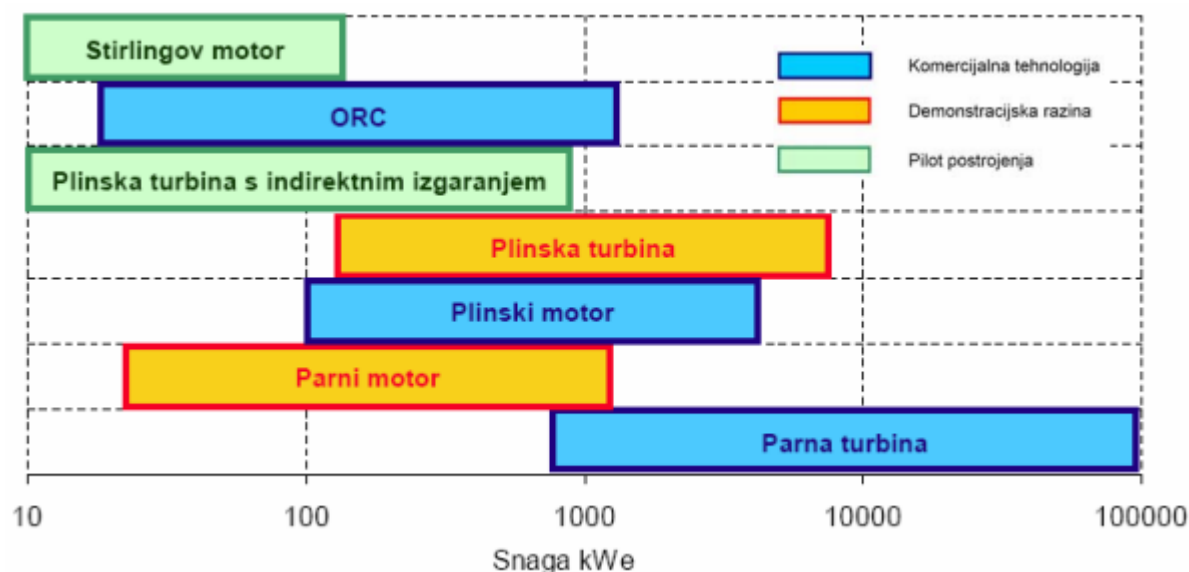
plinskih turbina na višoj razini učinkovitosti nego putem parnog ciklusa, osobito u postrojenjima manjeg kapaciteta. (<5 MWe do 10 MWe).

Što se tiče postrojenja većeg kapaciteta (>30 MWe) sustavi na bazi rasplinjavanja plina mogu biti kombinirani s plinskom turbinom s povratom topline i parnom turbinom (kombinirani ciklus), čime se poboljšava učinkovitost. Nekoliko projekata temeljenih na naprednim konceptima kao što je kombinirani ciklus rasplinjavanja s integriranom biomasom (BIGCC) nalazi se u planu u sjevernoj Europi, SAD-u, Japanu i Indiji [37].

U cilju promoviranja komercijalizacije učinkovitih, ekonomičnih i ekološki prihvatljivih projekata koji razvijaju rasplinjavanje, osnovana je grupa međunarodnih stručnjaka pod nazivom „Task 33“. Svoje ciljeve ispunjavaju kroz praćenje, razmatranje i razmjenjivanje informacija o istraživanju i razvoju rasplinjavanja biomase te potiču povezivanje zemalja koje su sudionici ove grupe. Svoj su prvi sastanak imali još 2001. godine, a trenutno su zemlje sudionice Austrija, Danska, Njemačka, Italija, Nizozemska, Norveška, Švedska, Švicarska i SAD [24]. Prema njihovim podacima sa posljednjeg sastanka 2016. godine postoji 86 komercijalnih, demonstracijskih i pilot postrojenja u zemljama članicama od čega ih je trenutno 62 u pogonu, 5 u izgradnji, 2 planirana 16 na čekanju, a za jedno status nije poznat. Od tih svih postrojenja čak 53 su kogeneracijska, 18 ih je u pogonu u svrhu sinteze plina, dok je ostatak ostala tehnologija rasplinjavanja (recimo isključiva proizvodnja topline) [25].

4.2. Tehnološki procesi

Kogeneracijska postrojenja se razlikuju prema tehnološkom procesu koji koriste. Budući da se komercijalno primjenjuju postrojenja sa ORC tehnologijom, plinskim motorima i parnim turbinama, njih će se obraditi u ovom poglavlju. Druge CHP tehnologije, kao što su Kalina ciklus, gorivni članci i neke druge su još uvijek su u fazi razvoja i očekuje se da će biti komercijalno dostupne u idućih nekoliko godina [26]. Na slici 18. je prikazan tržišni status različitih tehnologija kao i raspon primjena s obzirom na veličinu kogeneracijskog postrojenja.



Slika 18. Tržišni status različitih tehnologija kao i raspon primjena s obzirom na veličinu kogeneracijskog postrojenja [12]

4.2.1. Postrojenje sa parnom turbinom

Postrojenje sa parnom turbinom se sastoji od nekoliko osnovnih dijelova kao što su: generator pare, parna turbina, izmjenjivač topline ili kondenzator, otplinjač itd. Generator pare služi generiranje pare na željenom protoku, temperaturi i tlaku. U njemu se prenosi toplina dobivena izgaranjem goriva vodi, koja zatim pređe u parovito stanje. Para se može koristiti u različite svrhe kao što su proizvodnja električne energije, daljinsko grijanje, industrijski procesi ili njihove kombinacije ovisno o tlaku i temperaturi pare. Para se koristi za generiranje električne energije u parnoj turbini koja pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Nakon što je para prošla kroz turbinu, kondenzira se u vodu u kondenzatoru ili izmjenjivaču topline, pumpama se transportira do napojnog spremnika u kojem se otplinjava, te se vraća u generator pare. Korištenje ciklusa sa vodom i vodenom parom uključujući kotao i parnu turbinu je uobičajeno korištena tehnologija za proizvodnju električne energije iz različitih goriva, uključujući i biomasu. Ovaj ciklus također se naziva i Rankineov ciklus. Električna učinkovitost ciklusa jako ovisi o temperaturama isparavanja i kondenzacije. Učinkovitost će se povećati s višom temperaturom isparavanja i nižom temperaturom kondenzacije. Više temperature isparavanja zahtijevaju korištenje skupljih legura čelika u kotlu i parnim cijevima te na taj način povećavaju investicijske troškove postrojenja.

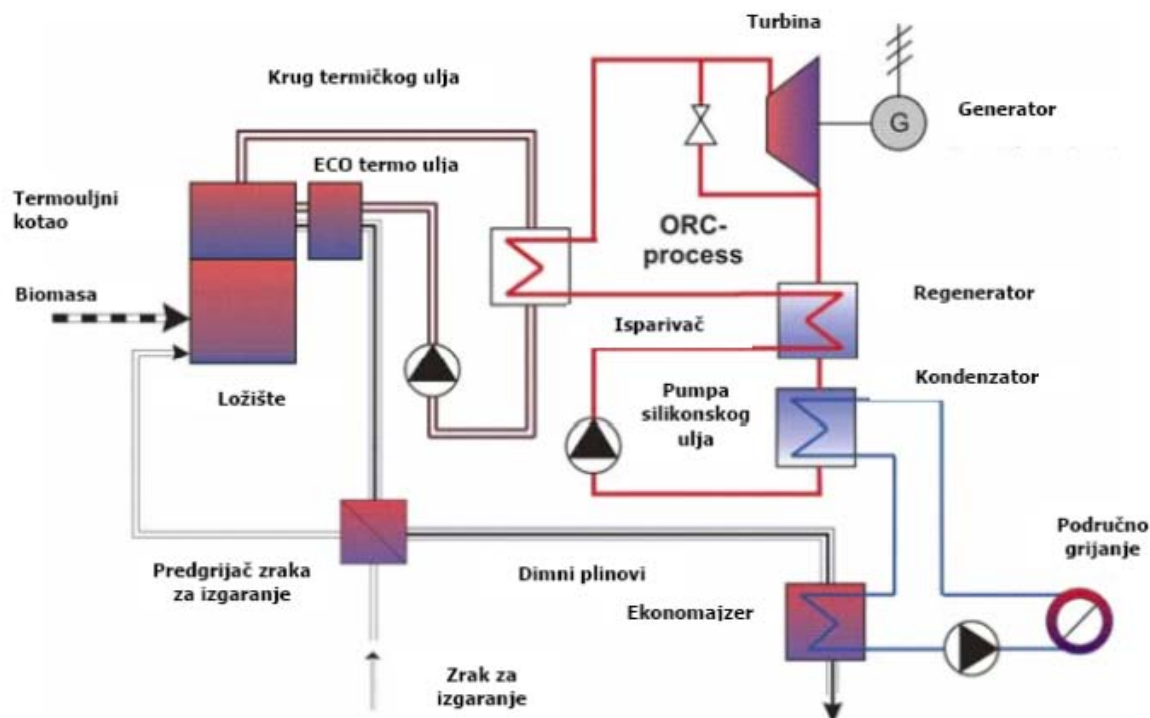
Što se tiče kogeneracijskih postrojenja, para na izlazu iz turbine se vodi u izmjenjivač topline. Količina topline koja se može povratiti iz izmjenjivača je normalno oko 40 do 60% energije iz goriva. Često je voda na izlazu iz izmjenjivača na temperaturi između 70 °C i 100 °C. Više temperature se mogu dobiti, međutim, to će imati negativan utjecaj na proizvodnju električne energije [27].

4.2.2. Postrojenje sa organskim Rankineovim ciklusom (ORC)

Organski Rankineov ciklus (ORC) je, kao što i sam naziv implicira, tehnologija koja se temelji na Rankineovom ciklusu. Radni fluid u ORC je organska tekućina visoke molekularne mase (silikonsko ulje, izopentan, izooktan, amonijak). Ova tekućina ima promjenu faze iz kapljevite u parnu fazu (vrelište) koja se događa na nižim temperaturama nego za vodenu paru. ORC se može koristiti za generiranje električne energije koristeći niskotemperaturne izvore toplinske energije. Tipični izvori topline su industrijska otpadna toplina, geotermalna toplina i toplina iz relativno jednostavnih sustava izgaranja biomase. U pogonu je više od 300 kogeneracijskih postrojenja na biomasu s ORC procesom [28].

Tipično, temperatura ulaza topline u ORC ciklus je do 300 °C do 350 °C, u usporedbi s 500 °C do 600 °C temperature pare koja se često se primjenjuje u ciklusima gdje je radni medij voda. Učinkovitost ovih procesa ovisi o temperaturi izvora topline. ORC će stoga imati teoretski nižu učinkovitost od ciklusa sa vodom koji radi na višim temperaturama.

Zbog nižih temperatura i tlakova karakterističnih za ORC, troškovi komponenti mogu biti manji od postrojenja sa klasičnim Rankineovim procesom korištenjem jeftinijih materijala, manjih debljina stjenke i jednostavnije konstrukcije. Općenito, niže radne temperature i tlakovi u ORC postrojenju također pojednostavljaju rad i održavanje i smanjuju potrebne vještine radnika. Na taj način su smanjeni i troškovi rada i održavanja [27]. Na slici 19. je prikazana shema ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu.



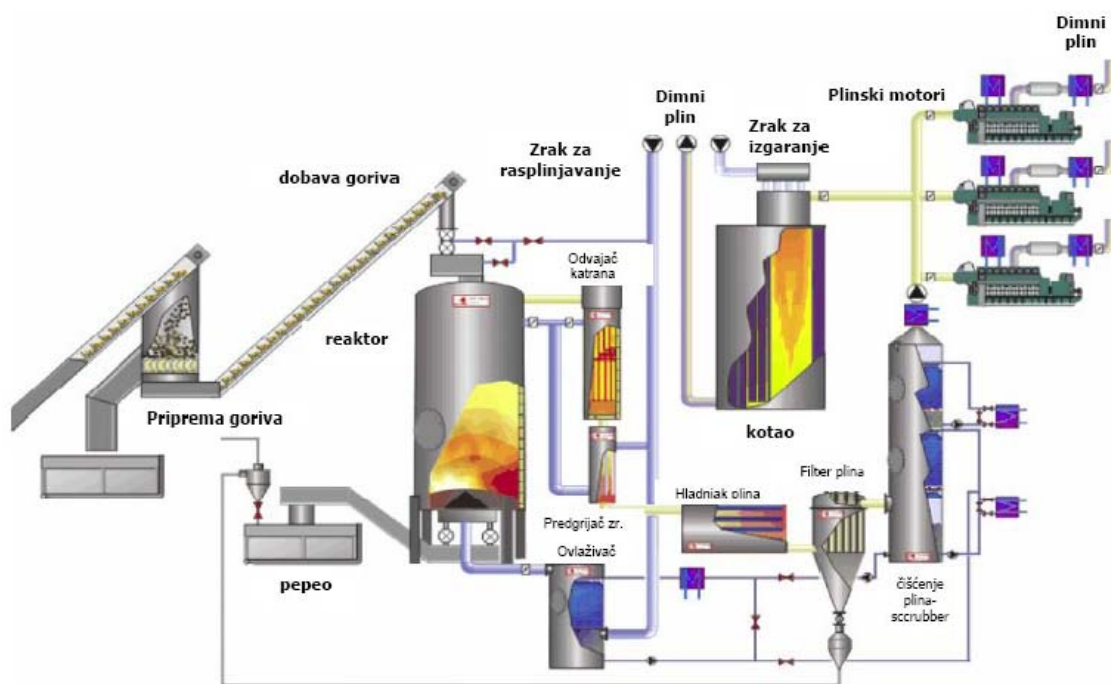
Slika 19. Shema ORC kogeneracijskog postrojenja na biomasu [12]

Često se koristi sustav zatvorenog kruga za prijenos topline toplinskog ulja kako bi se prenijela toplinska energija iz jedinice za izgaranje (npr. kotao za izgaranje biomase ili izvor otpadne topline) na ORC jedinicu. Ovi sustavi koriste organski fluid kao prijenosnika topline. Glavna prednost ovih sustava je da oni mogu biti dimenzionirani za rad na mnogo manjim tlakovima nego što je potrebno za sustave na bazi vodene pare. Međutim, potrebna je iznimna pažnja u dimenzioniranju i radu ovih sustava, jer su radni fluidi u pravilu zapaljivi i curenje može izazvati požar [27].

Kogeneracijsko postrojenje imat će manju električnu učinkovitost nego postrojenje namijenjeno samo za proizvodnju struju, jer su potrebne temperature za iskorištavanje toplinske energije najčešće više od temperatura u krugovima hlađenja. Kombinirana učinkovitost (električna i toplinska energija) će biti mnogo veća kod kogeneracijskog postrojenja nego kod postrojenja samo za proizvodnju električne energije. Ukupna učinkovitost može biti više od 90% kod dobro projektiranih ORC postrojenja. ORC postrojenja su dostupna u jedinicama veličine od nekoliko stotina kWe do 10-15 MWe [27].

4.2.3. Postrojenje sa plinskim motorom

Iako rasplinjavanjem biomase i izgaranjem sintetskog plina se najčešće dobiva viša električna učinkovitost od izgaranja krute biomase, ova postrojenja još uvijek nisu jako zastupljena na tržištu. Najveći razlog tomu su štetne tvari (kondenzirajući ugljikovodici, čestice, alkalni spojevi i spojevi sumpora i dušika) koje se nalaze u plinu koje je potrebno ukloniti prije izgaranja. Jedino ih nije potrebno ukloniti ako plin izgara izravno na ložištu kotla, jer se plin u tom slučaju zadržava dovoljno dugo na visokim temperaturama na kojima se uništavaju štetne tvari. Drugi razlog relativno male zastupljenosti na tržištu je slaba kvaliteta i ogrjevna vrijednost ovog plina (15 do 20% ogrjevnosti prirodnog plina) ako se kao sredstvo za rasplinjavanje koristi zrak. Ako se koristi kisik ili vodena para, ogrjevna vrijednost plina može doseći 40% vrijednosti ogrjevnog plina [12]. Na slici 20. je prikazana shema kogeneracijskog postrojenja s rasplinjačem biomase i plinskim motorom.



Slika 20. Shema kogeneracijskog postrojenja s rasplinjačem biomase i plinskim motorom [12]

Uklanjanje čestica štetnih tvari iz sintetskog plina se vrši vrećastim filterima ili elektrostatskim taložnicima. Katran i alkalni spojevi kondenziraju hlađenjem plina i na taj način se uklanjaju. To nije idealno rješenje za uklanjanje katrana i alkalnih spojeva zbog gubitaka toplinske energije, no to je jedini komercijalno razvijeni način rješavanja tog problema. Hlađenjem sintetskog plina, reaktora, ispušnih plinova, motora i ulja za podmazivanje se može dobiti toplinska energija koja se može iskoristiti za pokrivanje toplinskih potreba na lokaciji [12].

5. MASENI I ENERGETSKI TOKOVI

Za izradu analize isplativosti ulaganja u kogeneracijsko postrojenje u pilani potrebno je razmotriti masene i energetske tokove kako bi se vidjelo kojom sirovinom se raspolaže i koliko se toplinske i električne energije može dobiti. Također je bitno proračunati količinu energiju potrebnu za rad pilane. Analizirana pilana je kapaciteta 150 m³ obrađenih trupaca jelovine dnevno, te radi 16 sati dnevno, 250 dana u godini.

5.1. Maseni tokovi

U pilanu se dovoze trupci koji se režu na daske, te u tom procesu nastaju i neki nusproizvodi. Tablica 2. prikazuje pregled količina svih proizvoda pri preradi 100 kg jelovine u sirovom stanju (40% vlažnosti).

Tablica 2. Pregled količina proizvoda pri preradi 100 kg sirovog drveta jelovine

Proizvod	kg na 100 kg sirovog drveta jelovine
Drvena građa	62,27
Kora	5,92
Drvni okrajci	20
Piljevina	11.85

Udio vlage u sirovoj jelovini se mijenja ovisno o godišnjem dobu pa je uzeta prosječna vrijednost od 40%. Iz podataka dobivenih razgovorima sa djelatnicima u pilani su izračunate vrijednosti količina piljevine, drvnih okrajaka i kore iz 100 kg sirovog drveta jele.

5.2. Energetski tokovi

Pilana troši toplinsku energiju za sušenje drvne građe i grijanje postrojenja te električnu energiju za rad postrojenja. Iz podataka dobivenih razgovorom sa djelatnicima je zabilježeno da se dnevno potroši 7,2 MWh električne energije za rad postrojenja tj. godišnje 1.800 MWh električne energije.

Električna energija za rad postrojenja se kupuje iz elektroenergetskog sustava po cijeni od 0,6 kn/kWh [12], dok se toplinska energija za sušenje daske i za grijanje prostora dobiva spaljivanjem drvnih okrajaka i piljevine u kotlovnici pilane. Iz razgovora sa djelatnicima u pilani je dobiveno je da se godišnje spali 1.920 tona piljevine i drvnih okrajaka. Energetska vrijednost goriva je 2,9 MWh/t, a koeficijent učinkovitosti izgaranja je 0,8 [12], te se lako izračuna ukupna godišnja potrošnja toplinske energije u postrojenju od 4.454,4 MWh. U tablici 3. je prikazana potrošnja električne i toplinske energije u pilani.

Tablica 3. Potrošnja toplinske i električne energije u pilani

Vrsta energije	Potrošnja energije (MWh/godišnje)	Postotak potrošnje energije (%)
Potrošnja toplinske energije u postrojenju	4.454,4	65,26
Potrošnja električne energije u postrojenju	1.800	34,74

Slika 21. prikazuje kotao u kotlovnici postrojenja.



Slika 21. Kotao u kotlovnici pilane [17]

6. STUDIJA SLUČAJA - IMPLEMENTACIJA KONCEPTA BIORAFINERIJE U PILANSKO POSTROJENJE

Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, razvijene su brojne tehnologije korištenja drvene biomase te brojni tehnološki procesi kojima se primarna energija iz biomase može transformirati u korisnu električnu i toplinsku energiju.

U ovom radu su analizirana tri scenarija nadogradnje pilane u biorafineriju kroz izgradnju postrojenja za rasplinjavanje drvnih ostataka nastalih u pilani, te ugradnju kogeneracijskog postrojenja u sklopu pilane u prvom scenariju, uz sve to ugradnju postrojenja za proizvodnju peleta u drugom scenariju i ugradnju kogeneracijskog postrojenja sa ORC tehnologijom i postrojenja za proizvodnju peleta u trećem scenariju. Cilj je maksimalno iskoristiti drvene ostatke u radu pilane za pokrivanje energetske potrebe pilane i za proizvodnju peleta i njihovu prodaju na tržištu kako bi se ostvarile uštede i smanjila ovisnost o cijeni drvnih ostataka i električne energije na tržištu. Pilana dnevno obradi 150 m^3 trupaca jele gustoće 900 kg/m^3 [35]. Podaci o parametrima u pilanskoj obradi potrebni za proračun povrata investicije u kogeneracijsko postrojenje dijelom su preuzeti iz literature, dok je dio njih iskustven, tj. dobiven kroz razgovor prilikom posjete pilani. Svi ti parametri mogu varirati ovisno o stupnju tehnologije opreme koja je ugrađena u pilanu, tj. ne moraju biti jednaki za svaku pilanu. U ovom radu će se ispitati da li će zamjena toplinske energije dobivene izgaranjem drvnih ostataka i električne energije kupljene iz elektroenergetskog sustava sa energijom dobivenom iz kogeneracijskog postrojenja, smanjiti rashode pilane i povećati dobit. Uspoređena je dobit prije investicije, tj. dobit referentnog scenarija i dobit nakon investicije, odnosno dobit scenarija 1, 2 i 3.

S obzirom na raspoloživu količinu drvnih ostataka, snaga postrojenja koje se treba ugraditi u prvom scenariju je 1300 kWe. Tehnologija koja je potrebna za ovaj proces sastoji se od sušare za sušenje drvene sječke, 8 reaktora za rasplinjavanje sječke, 2 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina i 2 plinska motora nazivne snage po 650 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom.

Osnovno gorivo postrojenja je piljevina i usitnjeni okrajci drveta jelovine. Predviđeni rad elektrane je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 10750 tona piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa 40 % udjela vlage godišnje.

Snaga postrojenja koje se treba ugraditi u drugom scenariju je 650 kWe. Tehnologija koja je potrebna za ovaj proces sastoji se od sušare za sušenje drvene sječke, 4 reaktora za rasplinjavanje sječke, 1 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina i 1 plinskog motora nazivne snage po 650 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom, te od linije za peletiranje drvene biomase. Osnovno gorivo postrojenja je piljevina i usitnjeni okrajci drveta jelovine.

Predviđeni rad elektrane je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 5375 tona piljevine sa 40% udjela vlage godišnje. Utrošak sirovine za postrojenje za peletiranje je također predviđen na 5375 tona piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa 40% udjela vlage godišnje.

Snaga postrojenja koje se treba ugraditi u trećem scenariju je 300 kWe. Tehnologija koja je potrebna za ovaj proces sastoji se od kogeneracijskog postrojenja sa ORC tehnologijom sa turbinom nazivne snage 300 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom te od linije za peletiranje drvene biomase. Osnovno gorivo postrojenja je piljevina i usitnjeni okrajci drveta jelovine.

Predviđeni rad elektrane je 7000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 6035 tona piljevine sa 40% udjela vlage godišnje. Utrošak sirovine za postrojenje za peletiranje je predviđen na 4715 tona piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa 40% udjela vlage godišnje. Prema tim podacima modelirati će se gore navedeno postrojenje i provesti tehno-ekonomska analiza cjelogodišnjeg pogona. Uzevši u obzir prethodne činjenice razrađeni su scenariji za nadogradnju pilane u biorafineriju.

Opis scenarija:

- Scenarij 1 - Piljevina i usitnjeni drvni okrajci nastali u pilanskoj obradi se koriste za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane.
- Scenarij 2 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi koristi se za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane a dio se koristi u postrojenju za proizvodnju peleta.
- Scenarij 3 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi se koriste kao sirovina u kogeneracijskom postrojenju sa ORC tehnologijom a ostatak služi kao sirovina za proizvodnju peleta.

6.1. Referentni scenarij

U referentnom scenariju se potrebe pilane za električnom energijom podmiruju kupovinom iz elektroenergetskog sustava, a za toplinskom energijom spaljivanjem jednog dijela drvnih okrajaka u kotlovnici pilane. Ostatak drvnih okrajaka se usitnjava te transportira na spremište piljevine. Na spremište piljevine se također transportira piljevina nastala tijekom samog piljenja u pilani. Sva piljevina sa spremišta i kora se prodaju na tržištu.

6.1.1. Proračun referentnog scenarija

Za izračun dobiti pilane prije nadogradnje u biorafineriju potrebno je izračunati mase proizvoda i ostataka u radu pilane.

Masa drveta od kojeg se proizvodi drvena građa DG računa se prema jednadžbi (3)

$$DG = M * m_{dg} \quad (3)$$

gdje M predstavlja masu drvnih trupaca, a m_{dg} postotak drveta od kojeg nastaje drvena građa na masu drvnih trupaca, a iz razgovora sa djelatnicima u pilani m_{dg} je 62,27%.

Masa drvnih okrajaka i piljevine nastalih tijekom pilanske obrade DOiP računa se prema jednadžbi (4)

$$DOip = M * m_{doip} \quad (4)$$

gdje M predstavlja masu drvnih trupaca, a m_{doip} postotak drvnih okrajaka i piljevine na masu drvnih trupaca, a iz razgovora sa djelatnicima u pilani m_{doip} je 31,85%.

Masa kore K računa se prema jednadžbi (5)

$$K = M * m_k \quad (5)$$

gdje M predstavlja masu drvnih trupaca, a m_k postotak kore na masu drvnih trupaca, a iz razgovora sa djelatnicima u pilani m_k je 5,92%.

Iz razgovora sa djelatnicima u pilani je dobiveno da se za toplinske potrebe pilane godišnje spali 1.920 tone piljevine i drvnih okrajaka. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane prema jednadžbama 3. do 5. prikazane su u Tablici 4.

Tablica 4. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane referentnog scenarija

Mase proizvoda i drvnih ostataka u jednoj godini		
Masa drvnih trupaca:	33.750	t
Masa drveta od kojeg se proizvodi drvena građa:	21.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine:	10.750	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi za toplinske potrebe pilane:	1.920	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi za toplinske potrebe pilane:	17,9%	-
Masa drvnih okrajaka i piljevine koja se prodaje na tržištu:	8.830	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine koja se prodaje na tržištu:	81,4%	-
Masa kore:	2.000	t

U tablici 4. se vidi da se u pilani od 33.750 tone drvnih trupaca jele dobije otprilike 21.000 tone drveta od kojeg se kasnije proizvodi drvena građa, 10.750 tone drvnih okrajaka i piljevine i 2.000 tona kore.

Sljedeći korak je izračun potrošnje energije u pilani.

Količina električne energije potrebne za pogon postrojenja u jednoj godini E_g računa se prema jednadžbi (6)

$$E_g = P_e * t_{4000} \quad (6)$$

gdje P_e predstavlja prosječnu snagu električne energije, a t_{4000} predstavlja vrijeme rada pilane od 4000 sati godišnje. Iz razgovora sa djelatnicima u pilani je dobiveno da je P_e 450 kW.

Količina toplinske energije potrebne za sušenje drvene građe i grijanje postrojenja u jednoj godini računa se prema jednadžbi (7)

$$Q_g = H_d * m_s * \eta_t \quad (7)$$

gdje H_d predstavlja donju ogrjevnu vrijednost piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka, m_s predstavlja masu drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi za toplinske potrebe pilane, a η_t

predstavlja koeficijent učinkovitosti izgaranja. Prema [12] i iz razgovora sa djelatnicima u pilani, H_d je 2,9 MWh/t, m_s je 1920 tona, a η_t je 0,8.

Potrošnja energije u pilani prema jednadžbama (6) do (7). prikazana je u Tablici 5.

Tablica 5. Godišnja potrošnja energije u pilani referentnog scenarija

Godišnja potrošnja energije		
Električna energija potrebna za pogon postrojenja:	1.800	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje drvene građe i grijanje postrojenja:	4.454,4	MWh
Ukupno potrebno energije:	6.254,4	MWh

U tablici 5. se vidi da godišnja električna energija potrebna za pogon postrojenja iznosi 1.800 MWh, a godišnja toplinska energija potrebna za sušenje drvene građe i grijanje postrojenja iznosi 4.454,4 MWh.

Cijene električne energije i piljevine potrebne za izračun dobiti su uzeti iz [12]. Navedene cijene su prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Cijene električne energije i piljevine potrebne za proračun

Cijene električne energije i piljevine potrebne za proračun		
Cijena električne energije	0,6	kn/kWh
Cijena piljevine	260	kn/t

U tablici 6. su navedene cijene električne energije i piljevine jer će one biti relevantne za proračun dobiti pilane. Kao što je već navedeno, dio drvnih okrajaka se koristi kako bi se pokrile toplinske potrebe u pilani. Ostatak se prodaje na tržištu.

Budući da će se u svim scenarijima drveni trupci i kora kupovati i prodavati po istoj cijeni na tržištu, a drvo za drvenu građu će proći kroz iste procese prerade prije prodaje na tržištu, oni nisu relevantni za proračun dobiti pilane nakon nadogradnje u biorafineriju te su zanemareni u ovoj analizi.

Iznosi prihoda i rashoda pilane na bazi proizvedenih količina iz Tablice 4., utrošene energije iz Tablice 5. i cijena iz Tablice 6., u trajanju od 250 radnih dana, prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Prihodi i rashodi pilane

Prihodi				
Piljevina i usitnjeni drveni okrajci	260	kn/t	2.295.800	kn
Rashodi				
Električna energija	0,6	kn/kWh	1.080.000	kn

U ovoj analizi su također zanemareni podaci kao što su plaće djelatnika u pilani, te ostali troškovi u pilanskoj proizvodnji jer ova investicija ne utječe na njih.

Kao što se može vidjeti u Tablici 7. kupovina električne energije predstavlja značajan rashod u radu pilane. Bruto dobit pilane predstavljaju prihodi umanjeni za rashode. Novčani tok čini bruto dobit umanjena za vrijednost poreza na dobit, koji je računat prema poreznoj stopi od 18%.

Novčani tok pilane u referentnom scenariju prikazan je u Tablici 8.

Tablica 8. Novčani tok referentnog scenarija

Godina	Prihodi	Rashodi	Bruto dobit	Porez na dobit	Novčani tok
0					
1	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
2	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
3	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
4	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
5	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
6	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
7	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
8	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
9	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
10	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
11	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
12	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
13	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn
14	2.295.800 kn	1.080.000 kn	1.215.800 kn	218.844 kn	996.956 kn

Iz Tablice 8. se vidi da godišnja dobit pilane koja radi 250 dana i uzimajući u obzir samo prihode od prodaje piljevine i troškove kupnje električne energije iznosi 996.956 kn.

6.2. Scenarij 1 - Piljevina i usitnjeni drvni okrajci nastali u pilanskoj obradi se koriste za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane

Scenarij 1 predstavlja proizvodnju sintetskog plina u reaktoru u svrhu podmirenja toplinskih i električnih potreba pilane korištenjem piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka. Proizvedena toplinska energija je dovoljna za pokrivanje toplinskih potreba pilane i novonastalog postrojenja. Proizvedena električna energija je dovoljna za pokrivanje potreba pilane i novonastalog postrojenja te se višak električne energije predaje visokonaponskoj mreži.

6.2.1. Proračun scenarija 1

Za određivanje dobiti pilane u scenariju 1 potrebno je izračunati mase proizvoda i ostataka u radu pilane, kao i u referentnom scenariju. Za izračun mase drveta od kojeg se proizvodi drvena građa, drvnih okrajaka i piljevine i kore korištene su jednadžbe 3. do 5. U ovom scenariju se svi drvni okrajci i piljevina koriste kao sirovina za proizvodnju sintetskog plina. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 1 prema jednadžbama 3. do 5. prikazane su u Tablici 9.

Tablica 9. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 1

Mase proizvoda i drvnih ostataka u jednoj godini		
Masa drvnih trupaca:	33.750	t
Masa drveta od kojeg se proizvodi drvena građa:	21.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine:	10.750	t
Masa kore:	2.000	t

Kao što je navedeno u ovom scenariju se svi drvni okrajci i piljevina koriste kao sirovina za proizvodnju sintetskog plina. Konfiguracija je zamišljena kroz dvije linije proizvodnje plina, električne i toplinske energije sa 4 reaktora, jednim filterom plina sa hladnjacima i jednim plinskim motorom u svakoj.

Također, za izračun dobiti pilane potrebno je izračunati potrošnju energije scenarija 1. Potrošnja energije je veća za količinu toplinske energije potrebnu za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka prije rasplinjavanja, te za količinu električne energije potrebne za rasplinjavanje. Najprije je potrebno izračunati količinu sintetskog plina koji se može dobiti rasplinjivanjem.

Predviđeni rad elektrane na nominalnoj snazi je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 10750 tona piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa 40% udjela vlage godišnje.

Prema tome dobivamo maseni protok sirovine na ulazu u sušaru u iznosu:

$$m_s = 10750 \frac{t}{god} = 1343,75 \frac{kg}{h}$$

Prinos suhog sintetskog plina P_s računa se prema jednadžbi (8)

$$P_s = m_s * p_s \quad (8)$$

gdje m_s predstavlja protok sirovine na ulazu u sušaru, a p_s prinos suhog sintetskog plina na masu piljevine i drvnih okrajaka. Prema [18] p_s iznosi 0,0423 kmol/kg.

Energija sintetskog plina E_s računa se prema jednadžbi (9)

$$E_s = P_s * \Delta H_{md,ssp} * \frac{1000}{3600} kW \quad (9)$$

gdje P_s predstavlja prinos suhog sintetskog plina u kmol/h, a $\Delta H_{md,ssp}$ donju ogrjevnju vrijednost suhog sintetskog plina. Prema [18] $\Delta H_{md,ssp}$ iznosi 216,72 MJ/kmolssp.

Konfiguracija kogeneracijskog postrojenja ovog scenarija sastoji se od sušare za sušenje drvene sječke, 8 reaktora za rasplinjavanje sječke, 2 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina i 2 plinska motora nazivne snage po 650 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom.

Osnovni parametri projektiranog postrojenja su električna snaga do 1300 kWe i iskoristiva toplinska snaga do 2100 kW.

Proizvođač električne i toplinske energije biti će motor s unutrašnjim izgaranjem sa spojenim generatorom električne energije. Prema [18] navodi se električna, toplinska i ukupna učinkovitost ove kogeneracijske jedinice.

$$\eta_e = 0,37$$

$$\eta_t = 0,47$$

$$\eta_u = 0,84$$

Proizvodnja električne i toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju računa se prema jednadžbama (10) i (11)

$$El_{kp} = \eta_e * E_s \quad (10)$$

$$Q_{kp} = \eta_t * E_s \quad (11)$$

Sustavom hlađenja reaktora i hlađenja sintetskog plina, vratio se dio toplinske energije u toplovodni sustav koja se kasnije iskorištava za potrebe sušare i postrojenja.

Ukupna toplinska energija koja se proizvede u tom procesu računa se prema jednadžbi (12)

$$Q_{uk} = Q_{kp} + Q_{sp} + Q_r \quad (12)$$

gdje Q_{sp} predstavlja toplinu koja se u toplovodni sustav vrati hlađenjem sintetskog plina, a Q_r toplina koja se u sustav vrati hlađenjem reaktora. Prema podacima iz [18] može se pretpostaviti da zbroj $Q_{sp} + Q_r$ za postrojenje ovih dimenzija iznosi 400 kWt.

Toplinska energija potrebna za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka Q_{ss} računa se prema jednadžbi (13)

$$Q_{ss} = m_s * q_{ss} \quad (13)$$

gdje m_s predstavlja protok sirovine na ulazu u sušaru, a q_{ss} toplinsku energiju potrebnu za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka na masu piljevine i drvnih okrajaka. Prema [39] potrebno je oko 1200 BTU da bi isparila jedna funta (pound) vode, uključujući i zagrijavanje drvenih vlakana i vode u drvu. Kada se to preračuna u kWh i kg, dobije se podatak da je potrebno oko 775 kWh da bi isparilo 1000 kg vode, uključujući i zagrijavanje drvenih vlakana i vode u drvu. Ako se uzme drvo vlažnosti 40%, u 1000 kg drva imamo 400 kg vode, tj. u

2500 kg drva imamo 1000 kg vode. Budući da je za sušenje 2500 kg sirovog drva potrebno 775 kWh toplinske energije, lako je izračunati da je za 1000 kg potrebno 310 kWh toplinske energije pa će se uzeti podatak da q_{ss} iznosi 310 kWh/t.

Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži $P_{el,vn}$ računa se prema jednadžbi (14)

$$P_{el,vn} = (El_{kp} - t_{8000} * P_{bikp} - t_{4000} * P_e) * \eta_{tr} \quad (14)$$

gdje P_e predstavlja električnu energiju potrebnu za pogon pilane u vremenu od 4000 sati, P_{bikp} predstavlja električnu energiju potrebnu za pogon biorafinerije i kogeneracijskog postrojenja u vremenu od 8000 sati, a η_{tr} učinkovitost transformatora. Prema 6.1. P_e iznosi 450 kW, prema podacima iz [18] može se pretpostaviti da P_{bikp} za postrojenje ovih dimenzija iznosi 120 kW, a η_{tr} iznosi 98,9%.

Proizvodnja i potrošnja energije na godišnjoj razini potrebne za pogon postrojenja iz scenarija 1 prikazane su u Tablici 10.

Tablica 10. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 1 na godišnjoj razini

Proizvodnja i potrošnja energije		
Prinos suhog sintetskog plina (P_s)	454.725,8	kmol/god
Energija suhog sintetskog plina (E_s)	27.374,5	MWh
Proizvodnja električne energije u kogeneracijskom postrojenju (El_{kp})	10.128,6	MWh
Proizvodnja toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju (Q_{kp})	12.866	MWh
Ukupna proizvedena toplinska energija u postrojenju (Q_{uk})	16.066	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka (Q_{ss})	3.332,5	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje drvne građe i grijanje postrojenja (Q_g)	4.454,5	MWh
Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži ($P_{el,vn}$)	7.287,5	MWh
Toplinska bilanca:	8.279	MWh

Iz tablice 10. može vidjeti da je prinos suhog sintetskog plina 454.725,8 kmol godišnje. Energija tog plina je 27.374,5 MWh, te se od te energije u kogeneracijskom postrojenju može generirati 10.128,6 MWh električne energije i 12.866 MWh toplinske energije godišnje. Kada se toj toplinskoj energiji pridoda toplina koja se u toplovodni sustav vrati hlađenjem sintetskog plina i toplina koja se u sustav vrati hlađenjem reaktora dobije se ukupna toplina koja se dobije u ovom postrojenju na godišnjoj razini koja iznosi 16.066 MWh. Ta se toplinska energija koristi za pokrivanje toplinskih potreba biorafinerije. Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži iznosi 7.287,5 MWh na godišnjoj razini. Kao što je navedeno u tablici 1. fiksna tarifna stavka za elektrane na biomasu instalirane snage do uključivo 2 MW iznosi 1,25 kn/kWh.

Investicija se sastoji od sušare za sušenje drvne sječke, 8 reaktora za rasplinjavanje sječke, 2 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina i 2 plinska motora nazivne snage po 650 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom. Procijenjena vrijednost investicije je 40.000.000 kn prema [18], a servis i održavanje postrojenja iznosi oko 3% ukupne investicije tj. 1.200.000 kn godišnje.

Iznosi prihoda i rashoda pilane koja je nadograđena u biorafinerijsko postrojenje na godišnjoj bazi prikazani su u Tablici 11.

Tablica 11. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 1

Prihodi				
Prodaja električne energije	1,2	kn/kWh	9.109.432	kn
Rashodi				
Servis i održavanje postrojenja			1.200.000	kn

U Tablici 11. se može vidjeti prihod od prodaje električne energije od 9.109.432 kn i rashod od servisa i održavanja postrojenja od 1.200.000 kn.

Bruto dobit tvornice predstavljaju prihodi umanjeni za rashode. Razmatra se rad postrojenja u razdoblju od 20 godina. Vrijeme amortizacije ukupne vrijednosti kapitalne investicije je 20 godina. Investicija je amortizirana u dvadeset jednakih rata metodom linearne deprecijacije, a diskontna stopa pri izračunu neto sadašnje vrijednosti projekta iznosi 6%. Porezna osnovica za izračun poreza na dobit je bruto dobit umanjena za vrijednost rate amortizacije, a porez je računat po stopi od 18%. Novčani tok scenarija 1 prikazan je u Tablici 12.

Tablica 12. Novčani tok scenarija 1

Godina	Prihodi	Rashodi	Bruto dobit	Amortizacija	Porez na dobit	Novčani tok
0						-40.000.000 kn
1	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
2	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
3	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
4	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
5	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
6	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
7	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
8	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
9	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
10	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
11	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
12	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
13	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn
14	9.109.432 kn	1.200.000 kn	7.909.432 kn	2.000.000 kn	1.063.698 kn	6.845.734 kn

Iz Tablice 12. se može vidjeti da dobit pilane od piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka na godišnjoj bazi u scenariju 1 iznosi 6.845.734 kn.

Za izračun unutarnje stope povrata investicije i neto sadašnje vrijednosti projekta uspoređene su dobiti referentnog scenarija i scenarija 1. Rezultati usporedbe su prikazani u Tablici 13.

Tablica 13. Rezultati proračuna scenarija 1

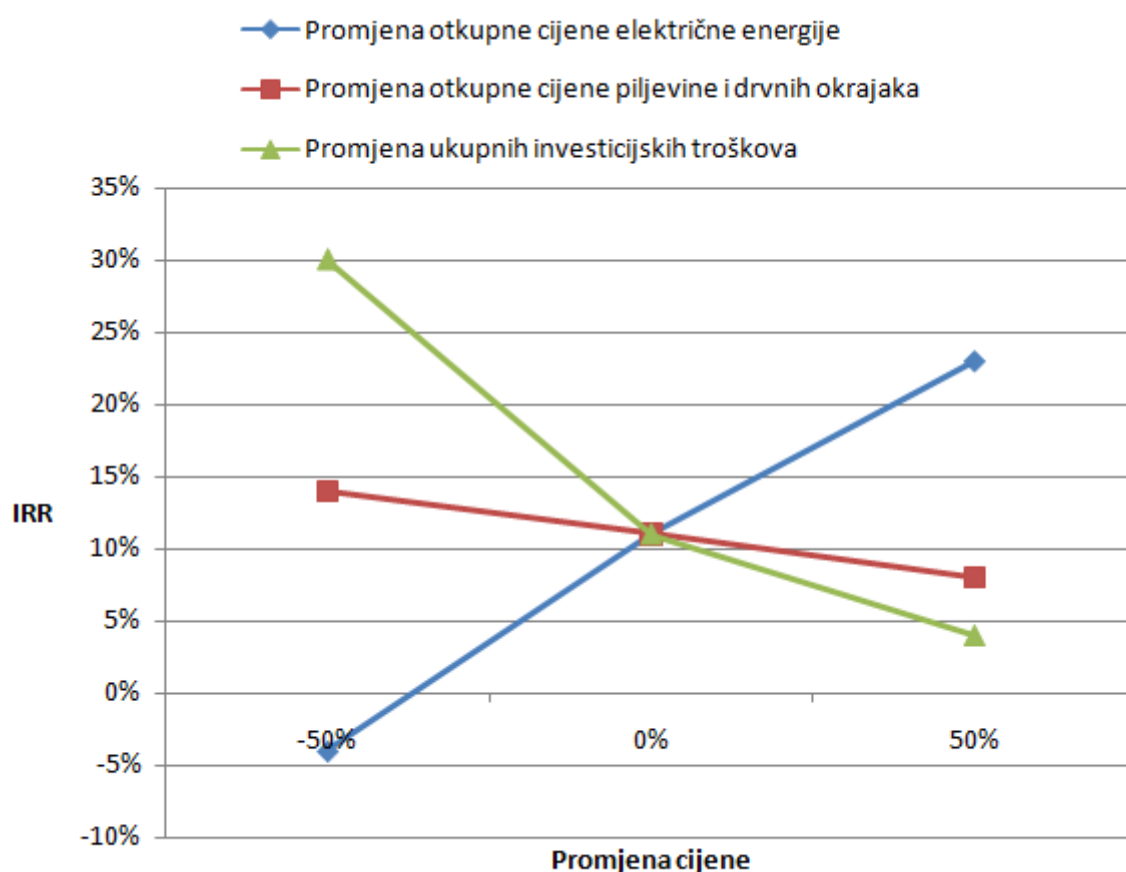
Godina	Dobit referentnog scenarija	Dobit scenarija 1	Bilanca
0			-40.000.000 kn
1	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
2	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
3	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
4	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
5	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
6	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
7	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
8	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
9	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
10	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
11	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
12	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
13	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn
14	996.956 kn	6.845.734 kn	5.848.722 kn

Temeljem podataka iz tablice, neto sadašnja vrijednost projekta iznosi 13.550.732 kn, a izračunati IRR iznosi 11%. Diskontna stopa je manja od IRR-a iz čega se donosi zaključak da se investicija isplati.

6.2.2. Analiza osjetljivosti scenarija 1

Analiza osjetljivosti je proučavanje varijabilnosti izlaznih rezultata matematičkog modela u ovisnosti o varijacijama vrijednosti ulaznih veličina u modelu. Drugačije iskazano, to je tehnika sistematske promjene vrijednosti ulaznih veličina modela da bi se analizirale posljedice takvih promjena.

Analizirati će se sljedeće 3 promjene i gledati će se njihov utjecaj na IRR a to su: promjena otkupne cijene električne energije, promjena otkupne cijene piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka i promjena ukupnih investicijskih troškova. Povećanje IRR-a je povoljno sa gledišta vremena povrata investicije, dok se smanjenje IRR-a negativno odražava na vrijeme otplate investicije, odnosno produžava to vrijeme. Slika 22. prikazuje promjenu unutrašnje stope povrata investicije na promjenu cijena od $\pm 50\%$.



Slika 22. Analiza osjetljivosti scenarija 1

Iz slike 24. se vidi da promjene otkupne cijene električne energije i ukupnih investicijskih troškova imaju veći utjecaj na vrijeme povrata investicije od promjene otkupne cijene

piljevine i drvnih okrajaka. Ukoliko otkupna cijena električne energije poraste za 50%, tj. postigne vrijednost od 1,875 kn/kWh, IRR će biti 23% što bi činilo investiciju vrlo isplativom. Padanjem otkupne cijene električne energije investicija postaje neisplativa. Padom ukupnih investicijskih troškova IRR značajno raste, a povećavanjem ukupnih investicijskih troškova IRR se polako smanjuje.

Što se tiče cijene sirovine za biorafineriju, čak i ako joj poraste cijena na tržištu za 50% tj. na 390 kn po toni, IRR će biti 8% što je i dalje veće od diskontne stope te investicija i dalje ostaje isplativa.

6.3. Scenarij 2 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi koristi se za proizvodnju sintetskog plina u reaktoru kako bi se podmirile toplinske i električne potrebe pilane a dio se koristi u postrojenju za proizvodnju peleta

Scenarij 2 predstavlja proizvodnju sintetskog plina u reaktoru u svrhu podmirjenja toplinskih i električnih potreba pilane korištenjem piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka te ugradnju postrojenja za proizvodnju peleta.

6.3.1. Proračun scenarija 2

Za određivanje dobiti pilane u scenariju 2 potrebno je izračunati mase proizvoda i ostataka u radu pilane, kao i u referentnom scenariju i u scenariju 1. Za izračun mase drveta od kojeg se proizvodi drvna građa, drvnih okrajaka i piljevine i kore korištene su jednadžbe 3 do 5. U ovom scenariju se pola drvnih okrajaka i piljevine koriste kao sirovina za proizvodnju sintetskog plina, a ostatak služi kao sirovina za proizvodnju peleta. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 2 prema prikazane su u Tablici 14.

Tablica 14. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 2

Mase proizvoda i drvnih ostataka u jednoj godini		
Masa drvnih trupaca:	33.750	t
Masa drveta od kojeg se proizvodi drvena građa:	21.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine:	10.750	t
Masa kore:	2.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi u kogeneracijskom postrojenju	5.375	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi za toplinske potrebe pilane:	50%	-
Masa drvnih okrajaka i piljevine od kojih se proizvode peleti:	5.375	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine od kojih se proizvode peleti:	50%	-

Za izračun dobiti pilane potrebno je izračunati potrošnju energije scenarija 2. Potrošnja energije za rasplinjavanje se smanjuje, ali se u ovom scenariju troše električna i toplinska energija za proizvodnju peleta. Postrojenje za proizvodnju peleta će raditi vremenski koliko i kogeneracijsko postrojenje, tj. 8000 sati godišnje.

Dobiveni peleti će biti vlažnosti 8%. Za njihovu proizvodnju će se koristiti sirovina vlažnosti 40%.

Ako pretpostavimo da je masa peleta vlažnosti 8% M_{pe} 100 kg, to znači da je masa vlage u tim peletima 8 kg, a masa suhe tvari M_s 92 kg. Masa sirovog drveta vlažnosti 40% M_{40} iz kojeg su proizvedeni navedeni peleti je jednaka zbroju M_s i M_{w40} gdje M_{w40} predstavlja masu vlage u sirovom drvetu vlažnosti 40%. Iz sustava dvije jednadžbe (15) i (16) sa dvije nepoznanice se onda može izračunati da je masa sirovog drveta vlažnosti 40% M_{40} iz kojeg su proizvedeni navedeni peleti jednaka 153,33 kg. To znači da je za proizvodnju 1 tone peleta otprilike potrebna 1,53 tona sirovine.

$$M_{40} = M_s + M_{w40} \quad (15)$$

$$M_{w40} = M_{40} * 0,4 \quad (16)$$

Maseni protok sirovine na ulazu u postrojenje za proizvodnju peleta m_{spe} iznosi:

$$m_{spe} = 5375 \frac{t}{god} = 671,9 \frac{kg}{h}$$

Ako uzmemo u obzir da je za proizvodnju 1 tone peleta otprilike potrebna 1,53 tona sirovine, onda se lako izračuna maseni protok proizvedenih peleta:

$$m_{pe} = 3513 \frac{t}{god} = 439,1 \frac{kg}{h}$$

Električna energija za proizvodnju peleta se računa po jednadžbi (17)

$$P_{pe} = m_{pe} * p_{pe} \quad (17)$$

gdje m_{pe} predstavlja maseni protok proizvedenih peleta, a p_{pe} specifičnu električnu energiju po toni proizvedenih peleta. Prema [36] p_{pe} iznosi 213,23 kWh/t.

Toplinska energija za proizvodnju peleta se računa po jednadžbi (18)

$$Q_{pe} = m_{pe} * q_{pe} \quad (18)$$

gdje m_{pe} predstavlja maseni protok proizvedenih peleta, a q_{pe} specifičnu toplinsku energiju po toni proizvedenih peleta. Prema [39] potrebno je oko 1200 BTU da bi isparila jedna funta (pound) vode, uključujući i zagrijavanje drvenih vlakana i vode u drvu. Kada se to preračuna u kWh i kg, dobije se podatak da je potrebno oko 775 kWh da bi isparilo 1000 kg vode, uključujući i zagrijavanje drvenih vlakana i vode u drvu. Ako se uzme drvo vlažnosti 40%, u 1000 kg drva imamo 400 kg vode. Potrebno je ukloniti 320 kg vode, ako je željena vlažnost peleta 8%, tj. da se ukloni 1000 kg vode, potrebno je 3125 kg sirovog drva. Ako se uzme podatak iz (15) i (16) da je za proizvodnju 1 tone peleta otprilike potrebna 1,53 tona sirovine, od 3125 kg sirovog drva se dobije 2043 kg peleta. Budući da je za dobivanje 2043 kg peleta potrebno 775 kWh toplinske energije, lako je izračunati da je za 1000 kg peleta potrebno 380 kWh toplinske energije pa će se uzeti podatak da q_{pe} iznosi 380 kWh/t.

Konfiguracija kogeneracijskog postrojenja ovog scenarija je zamišljena kroz liniju proizvodnje plina, električne i toplinske energije sa 4 reaktora, jednim filterom plina sa hladnjacima i jednim plinskim motorom. Osnovni parametri projektiranog postrojenja su električna snaga do 650 kW_e i iskoristiva toplinska snaga do 1050 kW.

Predviđeni rad elektrane na nominalnoj snazi je 8000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 5375 tona piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa 40% udjela vlage godišnje.

Prema tome dobivamo maseni protok sirovine na ulazu u sušaru u iznosu:

$$m_s = 5375 \frac{t}{god} = 671,9 \frac{kg}{h}$$

Prinos suhog sintetskog plina P_s , energija sintetskog plina E_s , proizvodnja električne i toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju El_{kp} i Q_{kp} , ukupna toplinska energija koja se proizvede u kogeneracijskom procesu i u procesu rasplinjavanja Q_{uk} , toplinska energija potrebna za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka Q_{ss} , ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži $P_{el,vn}$ se računaju prema jednadžbama (8), (9), (10), (11), (12), (13) i (14) s tim što se od $P_{el,vn}$ oduzima električna energija potrebna za proizvodnju peleta. Prema podacima iz [18] može se pretpostaviti da zbroj $Q_{sp} + Q_r$ za postrojenje ovih dimenzija iznosi 200 kWt, a P_{bikp} 60 kW.

Proizvodnja i potrošnja energije na godišnjoj razini potrebne za pogon postrojenja iz scenarija 2 prikazane su u Tablici 15.

Tablica 15. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 2 na godišnjoj razini

Proizvodnja i potrošnja energije		
Prinos suhog sintetskog plina (P_s)	227.363	kmol/god
Energija suhog sintetskog plina (E_s)	13.687	MWh
Proizvodnja električne energije u kogeneracijskom postrojenju ($P_{el,kp}$)	5.064	MWh
Proizvodnja toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju (Q_{kp})	6.432	MWh
Ukupna proizvedena toplinska energija u postrojenju (Q_{uk})	8.031	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka (Q_{ss})	1.666	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje drvne građe i grijanje postrojenja (Q_g)	4.454,5	MWh
Toplinska energija potrebna za proizvodnju peleta	1.332	MWh
Električna energija potrebna za proizvodnju peleta	747	MWh
Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži ($P_{el,vn}$)	2.014	MWh

Iz tablice 15. može vidjeti da je prinos suhog sintetskog plina 227.363 kmol godišnje. Energija tog plina je 13.687 MWh, te se od te energije u kogeneracijskom postrojenju može generirati 5.064 MWh električne energije i 6.432 MWh toplinske energije godišnje. Kada se toj toplinskoj energiji pridoda toplina koja se u toplovodni sustav vrati hlađenjem sintetskog plina i toplina koja se u sustav vrati hlađenjem reaktora dobije se ukupna toplina koja se dobije u ovom postrojenju na godišnjoj razini od 8.031 MWh. Ta se toplinska energija koristi za pokrivanje jednog dijela toplinskih potreba biorafinerije. Budući da su toplinske potrebe postrojenja u vrijeme rada pilane veće od ukupnog toplinskog toka koji se generira u postrojenju, ostatak od 1.937 MWh će se podmiriti kupovinom piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka sa tržišta te izgaranjem u postojećem ložištu. Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži iznosi 2.014 MWh na godišnjoj razini.

Kao što je navedeno u tablici 1, fiksna tarifna stavka za elektrane na biomasu instalirane snage do uključivo 2 MW iznosi 1,25 kn/kWh, a iz [26] je uzeta cijena peleta od 1000 kn/toni.

Investicija se sastoji od sušare za sušenje drvene sječke, 4 reaktora za rasplinjavanje sječke, 1 sustava za filtriranje i hlađenje sintetskog plina, 1 plinskog motora nazivne snage 650 kWe s pripadajućim generatorom električne energije i toplinskom podstanicom, te od linije za peletiranje drvene biomase. Procijenjena vrijednost investicije je 25.000.000 kn prema [18], a servis i održavanje postrojenja iznosi oko 3% ukupne investicije tj. 750.000 kn godišnje. Cijena dodatne piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka iznosi 300 kn po toni ako se uračuna i transport.

Iznosi prihoda i rashoda pilane koja je nadograđena u biorafinerijsko postrojenje na godišnjoj bazi prikazani su u Tablici 16.

Tablica 16. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 2

Prihodi				
Prodaja električne energije	1,25	kn/kWh	2.517.804	kn
Prodaja peleta	1000	kn/toni	3.506.197	kn
Ukupni prihodi			6.024.001	kn
Rashodi				
Piljevina i usitnjeni drvni okrajci	300	kn/t	250.500	kn
Servis i održavanje postrojenja			750.000	kn
Ukupni rashodi			1.000.050	kn

U Tablici 16. se može vidjeti prihod od prodaje električne energije od 2.517.804 kn, prihod od prodaje peleta od 3.506.197 kn i rashod od kupovine dodatne piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka od 250.500 kn i od servisa i održavanje postrojenja od 750.000 kn.

Bruto dobit tvornice predstavljaju prihodi umanjeni za rashode. Razmatra se rad postrojenja u razdoblju od 20 godina. Vrijeme amortizacije ukupne vrijednosti kapitalne investicije je 20 godina. Investicija je amortizirana u dvadeset jednakih rata metodom linearne deprecijacije, a diskontna stopa pri izračunu neto sadašnje vrijednosti projekta iznosi 6%. Porezna osnovica za izračun poreza na dobit je bruto dobit umanjena za vrijednost rate amortizacije, a porez je računat po stopi od 18%. Novčani tok scenarija 2 prikazan je u Tablici 17.

Tablica 17. Novčani tok scenarija 2

Godina	Prihodi	Rashodi	Bruto dobit	Amortizacija	Porez na dobit	Novčani tok
0						-25.000.000 kn
1	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
2	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
3	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
4	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
5	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
6	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
7	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
8	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
9	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
10	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
11	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
12	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
13	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn
14	6.024.001 kn	1.000.500 kn	5.023.500 kn	1.250.000 kn	679.230 kn	4.344.270 kn

Iz Tablice 17. se može vidjeti da dobit pilane od piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka na godišnjoj bazi u scenariju 2 iznosi 4.344.270 kn.

Za izračun unutarnje stope povrata investicije i neto sadašnje vrijednosti projekta uspoređene su dobiti referentnog scenarija i scenarija 2. Rezultati usporedbe su prikazani u Tablici 18.

Tablica 18. Rezultati proračuna scenarija 2

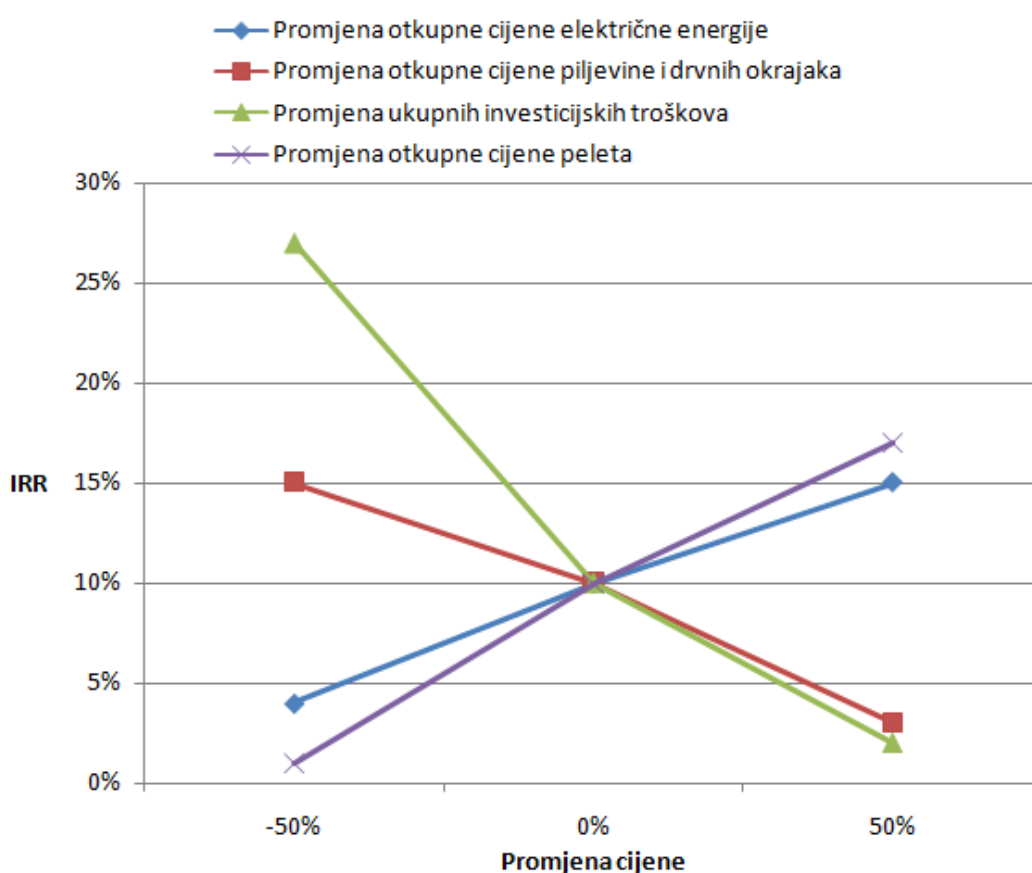
Godina	Dobit referentnog scenarija	Dobit scenarija 2	Bilanca
0			-25.000.000 kn
1	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
2	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
3	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
4	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
5	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
6	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
7	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
8	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
9	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
10	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
11	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
12	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
13	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn
14	996.956 kn	4.344.270 kn	3.347.314 kn

Temeljem podataka iz tablice, neto sadašnja vrijednost projekta iznosi 5.767.197,80 kn, a izračunati IRR iznosi 10%. Diskontna stopa je manja od IRR-a iz čega se donosi zaključak da se investicija isplati.

6.3.2. Analiza osjetljivosti scenarija 2

Analizirati će se sljedeće 4 promjene i gledati će se njihov utjecaj na IRR a to su: promjena otkupne cijene električne energije, promjena otkupne cijene piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka, promjena otkupne cijene peleta i promjena ukupnih investicijskih troškova.

Povećanje IRR-a je povoljno sa gledišta vremena povrata investicije, dok se smanjenje IRR-a negativno odražava na vrijeme otplate investicije, odnosno produžava to vrijeme. Slika 23. prikazuje promjenu unutrašnje stope povrata investicije na promjenu cijena od $\pm 50\%$.



Slika 23. Analiza osjetljivosti scenarija 2

Iz slike 25. se vidi da promjena otkupne cijene piljevine i drvnih okrajaka, otkupne cijene peleta, otkupne cijene električne energije i ukupnih investicijskih troškova od $\pm 50\%$ utječe na promjenu IRR-a, a ponajviše utječe promjena ukupnih investicijskih troškova. Od ostalih promjena, na IRR značajno utječe i promjena otkupne cijene peleta. IRR poraste na vrijednost

od 17% ako cijena peleta poraste na 1500 kn/toni, ako cijena padne na 500 kn/toni padne na vrijednost od 1%.

6.4. Scenarij 3 - Dio piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka nastalih u pilanskoj obradi se koriste kao sirovina u kogeneracijskom postrojenju sa ORC tehnologijom, a ostatak služi kao sirovina za proizvodnju peleta

Scenarij 3 predstavlja proizvodnju električne i toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju sa ORC tehnologijom za podmirenje toplinskih i električnih potreba pilane korištenjem piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka te ugradnju postrojenja za proizvodnju peleta.

6.4.1. Proračun scenarija 3

Za određivanje dobiti pilane u scenariju 3 potrebno je izračunati mase proizvoda i ostataka u radu pilane. Za izračun mase drveta od kojeg se proizvodi drvna građa, drvnih okrajaka i piljevine i kore korištene su jednadžbe 3. do 5. U ovom scenariju se jedan dio drvnih okrajaka i piljevine koriste kao sirovina za kogeneracijsko postrojenje, a od ostatka se proizvode peleti. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 3 prema jednadžbama 3 do 5. prikazane su u Tablici 19.

Tablica 19. Mase proizvoda i drvnih ostataka u radu pilane scenarija 3

Mase proizvoda i drvnih ostataka na godišnjoj bazi		
Masa drvnih trupaca:	33.750	t
Masa drveta od kojeg se proizvodi drvna građa:	21.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine:	10.750	t
Masa kore:	2.000	t
Masa drvnih okrajaka i piljevine koja se koristi u kogeneracijskom postrojenju	6.035	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine koja se koriste u kogeneracijskom postrojenju:	56%	-
Masa drvnih okrajaka i piljevine od kojih se proizvode peleti:	4.715	t
Maseni udio drvnih okrajaka i piljevine od kojih se proizvode peleti	44%	-

Za izračun dobiti pilane potrebno je izračunati potrošnju energije scenarija 2. U ovom scenariju se električna energija troši za rad pilane, proizvodnju peleta i vlastitu potrošnju ORC postrojenja. Toplinska energija se troši za grijanje postrojenja i sušenje drvene građe, te za sušenje peleta. Postrojenje za proizvodnju peleta će raditi vremenski koliko i kogeneracijsko postrojenje tj. 7000 sati godišnje.

Dobiveni peleti će biti vlažnosti 8%. Za njihovu proizvodnju će se koristiti sirovina vlažnosti 40%. Prema jednadžbama (15) i (16) se može izračunati da je za proizvodnju 1 tone peleta otprilike potrebna 1,53 tona sirovine.

Maseni protok sirovine na ulazu u postrojenje za proizvodnju peleta m_{spe} iznosi:

$$m_{spe} = 4715 \frac{t}{god} = 673,57 \frac{kg}{h}$$

Ako uzmemo u obzir da je za proizvodnju 1 tone peleta otprilike potrebna 1,53 tona sirovine, onda se lako izračuna maseni protok proizvedenih peleta:

$$m_{pe} = 3082 \frac{t}{god} = 440 \frac{kg}{h}$$

Električna i toplinska energija za proizvodnju peleta P_{pe} i Q_{pe} se računaju po jednadžbi (17) i (18). Konfiguracija kogeneracijskog postrojenja ovog scenarija sastoji se od postrojenja sa organskim Rankineovim ciklusom. Osnovni parametri projektiranog postrojenja su električna snaga do 300 kW_e i iskoristiva toplinska snaga do 1500 kW.

Predviđeni rad elektrane na nominalnoj snazi je 7000 sati, a utrošak sirovine je predviđen na 6035 tona piljevine i usitjenih drvnih okrajaka sa 40% udjela vlage godišnje.

Prema tome dobivamo maseni protok sirovine na ulazu u ložište kogeneracijskog postrojenja u iznosu:

$$m_s = 6035 \frac{t}{god} = 862 \frac{kg}{h}$$

Energija goriva se računa prema jednadžbi (19)

$$En_g = m_s * H_d \quad (19)$$

gdje H_d predstavlja donju ogrjevnu vrijednost piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka. Prema [12] H_d je 2,9 MWh/t.

Prema [12] navodi se električna, toplinska i ukupna učinkovitost kogeneracijske jedinice sa ORC procesom.

$$\eta_e = 0,12$$

$$\eta_t = 0,6$$

$$\eta_u = 0,72$$

Proizvodnja električne i toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju El_{kp} i Q_{kp} računaju se prema jednadžbama (10) i (11). U razdoblju kada pilana radi, tj. 4000 sati godišnje potrebna snaga za pilanu P_e je 450 kW, za ORC postrojenje P_{orc} je 47,8 kW, a za postrojenje za proizvodnju peleta P_{pe} je 93,8 kW, tj. ukupno 591,6 kW. Budući da je instalirana snaga P_{kp} 300 kW, ostatak električne energije u tom razdoblju će se kupovati iz mreže.

U razdoblju kada pilana ne radi, tj. 3000 sati godišnje je potrebna snaga samo za ORC postrojenje i postrojenje za proizvodnju peleta od 141,6 kW. U tom razdoblju će se energija prodavati na mrežu.

Ukupna električna energija koju postrojenje kupuje od elektroenergetskog sustava El_{kvn} računa se prema jednadžbi (20)

$$El_{kvn} = (P_e + P_{orc} + P_{pe} - P_{kp}) * t_{4000} \quad (20)$$

gdje t_{4000} predstavlja vrijeme od 4000 sati.

Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži El_{pvn} računa se prema jednadžbi (21)

$$El_{pvn} = (P_{kp} - P_{orc} - P_{pe}) * \eta_{tr} * t_{3000} \quad (21)$$

gdje η_{tr} predstavlja učinkovitost transformatora, a t_{3000} predstavlja vrijeme od 3000 sati. Prema podacima iz [18] η_{tr} iznosi 98,9%.

Proizvodnja i potrošnja energije na godišnjoj razini potrebne za pogon postrojenja iz scenarija 3 prikazane su u Tablici 20.

Tablica 20. Proizvodnja i potrošnja energije postrojenja iz scenarija 3 na godišnjoj razini

Proizvodnja i potrošnja energije		
Energija goriva (E_g)	17.500	MWh
Proizvodnja električne energije u kogeneracijskom postrojenju (El_{kp})	2.100	MWh
Proizvodnja toplinske energije u kogeneracijskom postrojenju (Q_{kp})	10.500	MWh
Toplinska energija potrebna za sušenje drvene građe i grijanje postrojenja (Q_g)	4.454,5	MWh
Toplinska energija potrebna za proizvodnju peleta (Q_{pe})	1.168	MWh
Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži (El_{pvn})	470	MWh
Ukupna električna energija koju postrojenje kupuje od elektroenergetskog sustava El_{kvn}	1.166	MWh
Toplinska bilanca:	4.877,5	MWh

Iz tablice 20. može vidjeti da je energija goriva 17.500 MWh godišnje, te se od te energije u kogeneracijskom postrojenju može generirati 2.100 MWh električne energije i 10.500 MWh toplinske energije. Ta se toplinska energija koristi za pokrivanje toplinskih potreba pilane i postrojenja za proizvodnju peleta. Ukupna električna energija koju postrojenje predaje visokonaponskoj mreži iznosi 470 MWh, a kupuje 1.168 MWh na godišnjoj razini. Kao što je navedeno u tablici 1, fiksna tarifna stavka za elektrane na biomasu instalirane snage do uključivo 300 kW iznosi 1,3 kn/kWh, a iz [26] je uzeta cijena peleta od 1000 kn/toni. Investicija se sastoji od postrojenja sa organskim Rankineovim ciklusom nazivne snage 300 kWe i iskoristive toplinske snage do 1500 kW, te od linije za peletiranje drvene biomase.

Procijenjena vrijednost investicije je 10.800.000 kn, a servis i održavanje postrojenja iznosi oko 3% ukupne investicije tj. 324.000 kn godišnje. Dodatna električna energija za rad postrojenja se kupuje iz elektroenergetskog sustava po cijeni od 0,6 kn/kWh [12].

Iznosi prihoda i rashoda pilane koja je nadograđena u biorafinerijsko postrojenje na godišnjoj bazi prikazani su u Tablici 21.

Tablica 21. Prihodi i rashodi pilane iz scenarija 3

Prihodi				
Prodaja električne energije	1,3	kn/kWh	611.439	kn
Prodaja peleta	1000	kn/toni	3.075.669	kn
Ukupni prihodi			3.687.108	kn
Rashodi				
Kupovina električne energije	0,6	kn/kWh	699.544	kn
Servis i održavanje postrojenja			324.000	kn
Ukupni rashodi			1.023.544	kn

U Tablici 16. se može vidjeti prihod od prodaje električne energije od 611.439 kn, prihod od prodaje peleta od 3.075.669 kn i rashod od kupovine električne energije od 699.544 kn i od servisa i održavanje postrojenja od 324.000 kn.

Bruto dobit tvornice predstavljaju prihodi umanjeni za rashode. Razmatra se rad postrojenja u razdoblju od 20 godina. Vrijeme amortizacije ukupne vrijednosti kapitalne investicije je 20 godina. Investicija je amortizirana u dvadeset jednakih rata metodom linearne deprecijacije, a diskontna stopa pri izračunu neto sadašnje vrijednosti projekta iznosi 6%. Porezna osnovica za izračun poreza na dobit je bruto dobit umanjena za vrijednost rate amortizacije, a porez je računat po stopi od 18%. Novčani tok scenarija 3 prikazan je u Tablici 22.

Tablica 22. Novčani tok scenarija 3

Godina	Prihodi	Rashodi	Bruto dobit	Amortizacija	Porez na dobit	Novčani tok
0						-10.800.000 kn
1	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
2	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
3	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
4	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
5	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
6	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
7	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
8	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
9	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
10	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
11	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
12	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
13	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn
14	3.687.108 kn	1.023.544 kn	2.663.564 kn	540.000 kn	382.241 kn	2.281.322 kn

Iz Tablice 22. se može vidjeti da dobit pilane od piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka na godišnjoj bazi u scenariju 3 iznosi 2.281.322 kn.

Za izračun unutarnje stope povrata investicije i neto sadašnje vrijednosti projekta uspoređene su dobiti referentnog scenarija i scenarija 3. Rezultati usporedbe su prikazani u Tablici 23.

Tablica 23. Rezultati proračuna scenarija 3

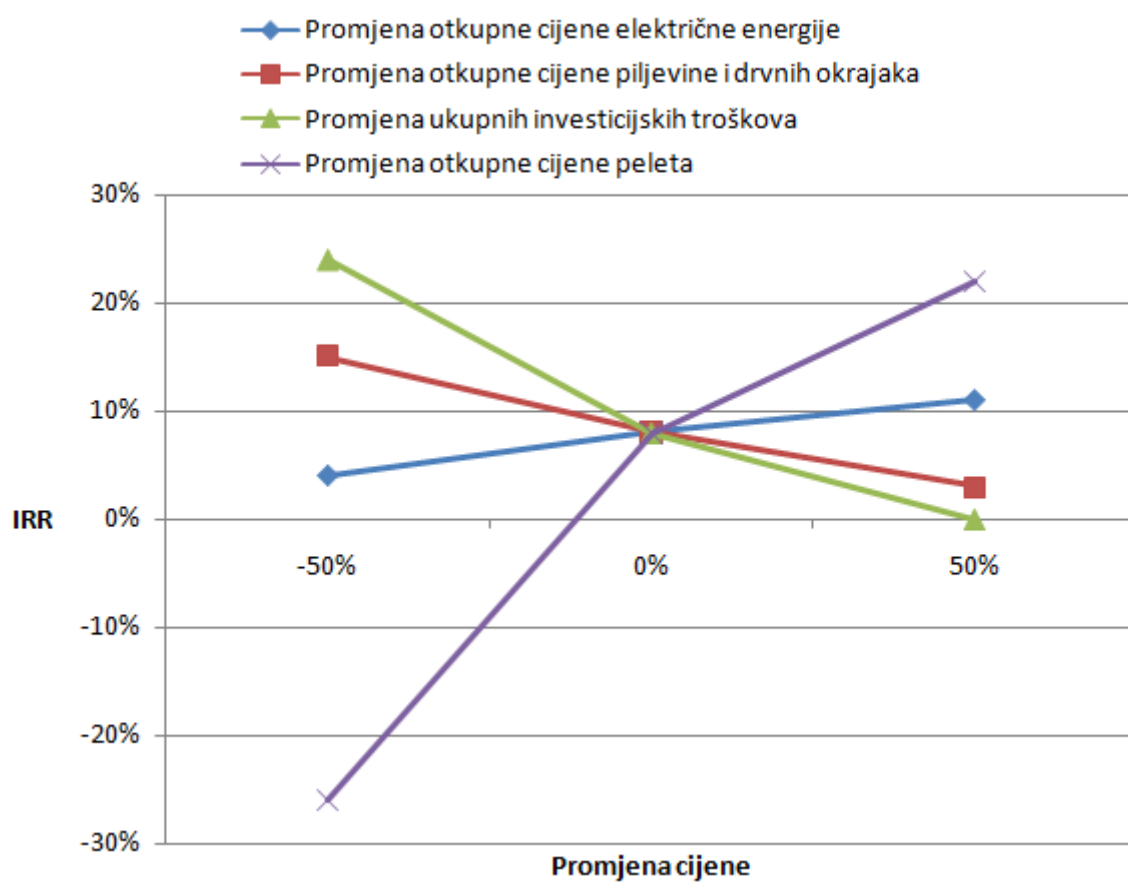
Godina	Dobit referentnog scenarija	Dobit scenarija 3	Bilanca
0			-10.800.000 kn
1	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
2	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
3	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
4	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
5	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
6	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
7	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
8	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
9	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
10	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
11	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
12	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
13	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn
14	996.956 kn	2.281.322 kn	1.284.366 kn

Temeljem podataka iz tablice, neto sadašnja vrijednost projekta iznosi 1.073.739,12 kn, a izračunati IRR iznosi 8%. Diskontna stopa je manja od IRR-a iz čega se donosi zaključak da se investicija isplati.

6.4.2. Analiza osjetljivosti scenarija 3

Analizirati će se sljedeće 4 promjene i gledati će se njihov utjecaj na IRR a to su: promjena otkupne cijene električne energije, promjena otkupne cijene piljevine i usitnjenih drvnih okrajaka, promjena otkupne cijene peleta i promjena ukupnih investicijskih troškova.

Povećanje IRR-a je povoljno sa gledišta vremena povrata investicije, dok se smanjenje IRR-a negativno odražava na vrijeme otplate investicije, odnosno produžava to vrijeme. Slika 24. prikazuje promjenu unutrašnje stope povrata investicije na promjenu cijena od $\pm 50\%$.



Slika 24. Analiza osjetljivosti scenarija 3

Iz slike 26. se vidi da promjena cijena piljevine i drvnih okrajaka, peleta i otkupne cijene električne energije od $\pm 50\%$ utječe na promjenu IRR-a, a ponajviše utječe promjena cijene peleta. IRR poraste na najvišu vrijednost od 22% ako cijena peleta poraste na 1500 kn/toni, a ako cijena padne na 500 kn/toni padne na vrijednost od -26%.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio pokušati povećati dobit pilane uvođenjem koncepta biorafinerije i iskorištavanjem ostataka iz pilanske proizvodnje. Cilj je bio i konfigurirati kogeneracijsko postrojenje kako bi se energija te sirovine mogla iskoristiti za pokrivanje energetske potreba pilane te ugradnjom postrojenja za proizvodnju peleta. Takav koncept nadogradnje pilane gdje se od ostataka iz pilanske obrade može proizvesti energija potrebna za rad pilane i drugi proizvodi koji imaju svoju vrijednost na tržištu te se na taj način može smanjiti ovisnost o energentima odgovara konceptu biorafinerije. U radu su opisane osnovne tehnologije u preradi drveta, definiran je koncept biorafinerije te je napravljena klasifikacija biorafinerija gdje je detaljno prikazano od kojih se sirovina i kojim procesima pretvorbe mogu dobiti razni proizvodi (energija, kemikalije, materijali itd.). Također su opisane i tehnologije i tehnološki procesi kojima se može dobiti električna i toplinska energija iz drvene biomase u kogeneracijskim postrojenjima. Razrađen je referentni scenarij u kojem su izračunate masene i energetske bilance, i ekonomska analiza postojećeg rada pilane, scenarij 1 u kojem je pilana nadograđena u biorafineriju u kojoj bi se proizvodio sintetski plin, scenarij 2 gdje bi se jedan dio sirovine koristio za proizvodnju sintetskog plina, a od drugog dijela bi se proizvodili peleti u postrojenju za proizvodnju peleta i scenarij 3 gdje bi se jedan dio sirovine koristio u kogeneracijskom postrojenju sa ORC tehnologijom, a od drugog dijela bi se proizvodili peleti u postrojenju za proizvodnju peleta te su uspoređeni novčani tokovi i dobici pilane. Postrojenje je koncipirano za rad sa osnovnim gorivom (piljevinom i usitnjenim drvnim okrajcima). Rezultati proračuna su pokazali da je nadogradnja isplativa u svim scenarijima, najviše u prvom, a najmanje u trećem. U analizi osjetljivosti prvog scenarija je pokazano da najveći utjecaj na isplativost investicije ima promjena otkupne cijene električne energije, u drugom scenariju najveći utjecaj na isplativost investicije ima promjena ukupnih investicijskih troškova, dok u trećem scenariju najveći utjecaj na isplativost investicije ima promjena cijene peleta. Investicijom u ove scenarije smanjuje se emisija stakleničkih plinova jer se električna energija dobiva iz biomase tj. iz obnovljivog izvora energije, što ovu investiciju čini ekološkom.

LITERATURA

- [1] Techno-dom.hr.-Energija biomase, Dostupno na: <http://www.tehno-dom.hr/obnovljivi-izvori-energije/energija-biomase>
- [2] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike RH, Strategija niskougljičnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje do 2030. s pogledom na 2050. godinu, 2017.
- [3] Službeni list Europske unije: "Pariški sporazum (prijevod)", Dostupno na: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=HR](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=HR)
- [4] Ministarstvo gospodarstva, Nacionalni akcijski plan za obnovljive izvore energije do 2020. godine, (2013)
- [5] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije - (NN 133/2013, 151/2013, 20/2014, 107/2014, 100/2015)
- [6] Forest Biomass Residuals Worthy of Carbon Neutral Recognition, American Forest and Paper Association, 2018.
- [7] Kralik, D., Energetski produkti iz biomase, poljoprivredni fakultet u Osijeku, Dostupno na: <http://hgk.biznet.hr/hgk/fileovi/11061.pdf>
- [8] Energetika-net, Dostupno na: <http://energetika-net.hr/skola/oie/energija-biomase>
- [9] Duić, N., Osnove energetike, digitalni udžbenik, Dostupno na: <http://powerlab.fsb.hr/osnoveenergetike/wiki>
- [10] Alakangas, E., Heikkinen, A., Lensu, T., Vesterinen, P., Biomass fuel trade in Europe - Summary report, EUBIONET II-project, Juväskylä, 2007
- [11] Hamar promet.hr, Dostupno na: <http://hamar-promet.hr/index.php/hr/>
- [12] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M.: Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Zagreb, 2009
- [13] Pfeifer, A., Diplomski rad: Analiza potencijala proizvodnje biomase iz brzorastućih nasada s neobrađenih poljoprivrednih zemljišta za korištenje u energetske postrojenjima u Republici Hrvatskoj, 2015
- [14] AEIOBIOM - Bioenergy Europe, Dostupno na: <http://www.aeioiom.org/>
- [15] Ištvančić, J., Trušček, A., Delajković, D.: Pilanska obrada drva, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, 2001
- [16] Hrvatski zavod za zaštitu zdravlja i sigurnost na radu, Smjernice za siguran rad na pilani. Dostupno na: <http://hzzsr.hr>

- [17] Pilana – vlastite fotografije
- [18] Kudeljčan, V., Diplomski rad: Kogeneracijsko postrojenje s rasplinjavanjem drvene biomase, 2018
- [19] Borovec B., Senčić T., Usporedba troškova drvoprerađivačkog pogona sa kogeneracijskim energetske sustavom na drvenu sječku i klasičnog drvoprerađivačkog pogona, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2017
- [20] B and W Volund, Dostupno na:
http://www.volund.dk/technologies_products/biomass_energy_systems/combustion_grates/vibration_grate_hvb_water_cooled/illustrations_of_the_hvb_grate
- [21] Kinini, J., Solutions for bioenergy – Fluidized bed boilers, The Finnish-Estonian seminar on Biomass technology and total chain solutions, September 2005, Dostupno na:
<http://www.greenetfinland.fi/en/clusters/energy/current-activities/biomass-seminar12-sep-2005.html>
- [22] Priručnik o gorivima iz drvene biomase; Regionalna energetska agencija Sjeverozapadne Hrvatske, 2008
- [23] Xylowatt – Notar Gasifier, Dostupno na: <http://www.xylowatt.com/notar-gasifier/>
- [24] Task 33: Gasification biomass and waste, Dostupno na:
<http://www.ieabioenergytask33.org>
- [25] Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33, Dr. Hrbek, Vienna University of Technology, Austria, April 2016
- [26] Danon G., Furtula M., Mandić M.: Possibilities of implementation of CHP (combined heat and power) in the wood industry in Serbia, 2012
- [27] International Finance Corporation: Converting Biomass to Energy, A Guide for Developers and Investors, 2017
- [28] Turboden.com, Dostupno na: www.turboden.it
- [29] de Jong E, Langeveld H, van Ree R. IEA Bioenergy Task 42 biorefinery. 2009. Dostupno na: <https://www.ieabioenergy.com>
- [30] Åberg, K., Biomass conversion through syngas-based biorefineries, UMEÅ University, 2017
- [31] Schieb, P.-A., Lescieux-Katir, H., Thénot, M., Clément-Larosière, B.: Biorefinery 2030 Future Prospects for the Bioeconomy, 2015.
- [32] Keith Waldron: Advances in Biorefineries Biomass and Waste Supply Chain Exploitation, 2014.

- [33] L.A. Edye, W.O.S. Doherty, J.A. Blinco, G.E. Bullock: The Sugarcane Biorefinery: Energy Crops and Processes for the Production of Liquid Fuels and Renewable Commodity Chemicals, 2005.
- [34] Energy.gov: Integrated biorefineries, Dostupno na: <https://energy.gov/eere/bioenergy/integrated-biorefineries>
- [35] Kolibica.com-Tehničke osobine jele, Dostupno na: <http://www.kolibica.com/svojstva-drvene-gradje/tehnicke-osobine-jele.html>
- [36] Risović, S., Đukić, I., Vučković, K.: Energy Analysis of Pellets Made of Wood Residues, 2008.
- [37] Krstinić Nižić, M., Hustić, A.: Modeli odgovornosti povlaštenih proizvođača obnovljivih izvora energije za odstupanja od planova proizvodnje, izd.3, Rijeka, 2015
- [38] Uredba o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija - (NN 116/2018)
- [39] Lumber Drying Theory; Frank Controls Ltd., 1986

PRILOZI

I. CD-R disc